

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Інженерно-фізичний факультет
Високотемпературних матеріалів та порошкової металургії

«На правах рукопису»
 УДК 621.762.52

«До захисту допущено»
 Завідувач кафедри
В. І. Мазур
 (ініціали, прізвище)
 “ ” 2019 р.

Магістерська дисертація
за освітньо-професійною програмою
Комп’ютеризовані технології порошкової металургії

зі спеціальності 136 Металургія
 на тему: Оптимізація технології виготовлення виробів з твердих сплавів для роботи в умовах ударних навантажень

Виконав: магістрант II курсу, групи ФП-81мп
 (шифр групи)

Лук’янов Сергій Сергійович
 (прізвище, ім’я, по батькові) (підпис)

Науковий керівник доц., к.т.н., Білик І. І.
 (посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант доц., к.т.н., Арламов О. Ю.
 (розділ охорони праці) (науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали) (підпис)

Консультант доц., к.е.н., Петренко К. В.
 (економічно-організац. розділ) (науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали) (підпис)

Нормоконтроль доц., к.т.н., Бірюкович Л. О.
 (науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали) (підпис)

Рецензент доц., к.т.н., Гриненко К. М.
 (посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає
 запозичень з праць інших авторів без відповідних
 посилань
 Магістрант _____
 (підпис)

Київ – 2019 року

ВІДОМІСТЬ МАГІСТЕРСЬКОЇ ДИСЕРТАЦІЇ

| <i>№ з/п</i> | <i>Формат</i> | <i>Позначення</i> | <i>Найменування</i> | <i>Кількість листів</i> | <i>Примітка</i> |
|------------------|---------------|-------------------|---------------------|-------------------------|--|
| 1 | A4 | | Завдання на | | |
| | | | магістерську | | |
| | | | дисертацію | 4 | |
| 2 | A4 | | Пояснювальна | | |
| | | | записка | 127 | |
| 3 | A4 | | Презентація | 9 | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | ФП81мп.8103.1103.005.00 | |
| | | ПІБ | Підп. | Дата | |
| Розробн. | | Лук'янов С. С. | | | <div>ВІДОМІСТЬ МАГІСТЕРСЬКОЇ ДИСЕРТАЦІЇ</div> <div>Лист</div> <div>1</div> <div>Листів</div> <div>1</div> <div>КПІ імені Ізгоря Сікорського каф. ВТМ та ПМ гр. ФП-81мп</div> |
| Керівн. | | Білик І. І. | | | |
| Консульт. | | | | | |
| Н/контр. | | Бірюкович Л. О. | | | |
| Зав.каф. | | Мазур В. І. | | | |

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

| | |
|------------------------------|---|
| Факультет | Інженерно-фізичний |
| Кафедра | Високотемпературних матеріалів та порошкової металургії |
| Рівень вищої освіти | другий (магістерський) |
| Спеціальність | 136 МЕТАЛУРГІЯ |
| Освітньо-професійна програма | Комп'ютеризовані технології порошкової металургії |

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

В. о. завідувача кафедри

Мазур В. І. _____

(прізвище ініціали)

(підпис)

“ ” _____ 2019 р.

З А В Д А Н Н Я

на магістерську дисертацію магістранту

Лук'янову Сергію Сергійовичу

1. Тема дисертації: Оптимізація технології виготовлення виробів з твердих сплавів для роботи в умовах ударних навантажень

Науковий керівник: доцент, к.т.н. Білик І. І.
затверджений наказом по університету від 12 листопада 2019 року № 3890-с.

2. Строк подання дисертації: 20.12.2019р.

3. Вихідні дані до дисертації: Аналіз сучасного стану виробництва виробів, що працюють в умовах ударних навантажень, виготовлених з твердих сплавів повинен дати можливість сформулювати основні проблеми та напрямки їх вирішення.

4. Зміст пояснювальної записки:

а) літературний огляд:

— проаналізувати сучасний стан використання виробів із твердих сплавів;

- проаналізувати особливості спікання твердих сплавів та методи регулювання твердості в них;

- провести аналіз математичних моделей поведінки твердих сплавів в умовах ударних навантажень.

б) матеріали та методи досліджень:

- отримати зразки після вакуумного спікання;

- провести комплексні дослідження структури та механічних властивостей сплаву ВК8 за експериментальними режимами спікання.

в) результати досліджень та їх обговорення:

- проаналізувати отримані результати;

- обґрунтовують природу явищ, які супроводжують процеси формування властивостей матеріалів та розкривають природу цих властивостей.

г) розділ охорони праці та безпеки в надзвичайній ситуації:

- визначити шкідливі та небезпечні виробничі фактори;

- проаналізувати безпечність технологічного процесу та виробничого обладнання.

д) енергетичний розділ:

- провести розрахунок кількості електроенергії, необхідної для забезпечення нормальної роботи цеху;

е) економічний розділ:

- обґрунтувати необхідну кількість робітників та управлінського персоналу, розмір фонду їх заробітної плати, визначити показники продуктивності праці;

- довести, що розроблений проект є ефективний.

ж) розробка стартап-проекту:

- провести маркетинговий аналіз, для виявлення ринкової можливості використання результатів магістерської дисертації.

5. Перелік графічного матеріалу: презентація.

6. Консультанти розділів дисертації:

| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата | |
|---|--|-------------------|---------------------|
| | | завдання видав | завдання прийняв |
| Економічний розділ | Петренко К. В. | | |
| Розділ охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях | Арламов О. Ю. | | |

7. Дата видачі завдання: 09.09.2019 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № п/п | Назва етапів виконання магістерської дисертації | Строк виконання етапів магістерської дисертації | Примітка |
|-------|---|---|----------|
| 1 | Літературний огляд | 24.09.2019 | |
| 2 | Отримання експериментальних даних | 17.10.2019 | |
| 3 | Аналіз отриманих результатів та побудова моделі розповсюдження тріщини | 11.11.2019 | |
| 4 | Обґрунтування результатів | 26.11.2019 | |
| 5 | Розробка розділу охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях | 27.11.2019 | |
| 6 | Розрахунок енергетичного розділу | 30.11.2019 | |
| 7 | Розробка економічного розділу та стартап- проекту | 02.12.2019 | |
| 8 | Оформлення пояснювальної записки | 12.12.2019 | |

Магістрант _____
 Науковий керівник дисертації _____

Лук'янов С. С.
 Білик І. І.

**Пояснювальна записка
до магістерської дисертації**

**на тему: Оптимізація технології виготовлення виробів з твердих сплавів для
роботи в умовах ударних навантажень**

Київ - 2019

РЕФЕРАТ

Робота вміщує: стор. – 127, рис. – 30, табл. – 38, літ. – 52.

МОДЕЛЬ ПОШИРЕННЯ ТРІЩИНИ, ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ СПІКАННЯ, ТВЕРДІ СПЛАВИ.

У даній роботі викладено літературний огляд стану теорії та процес отримання виробів на основі карбіду вольфраму.

Об'єктом дослідження в дисертації є тверді сплави на основі карбіду вольфраму.

Метою роботи є виявлення певних залежностей, що впливають на ряд механічних властивостей та структуру зразків відповідно до заданих режимів спікання та як результат – побудова математичної моделі оптимізації режимів спікання.

Методи дослідження:

- металографічний аналіз (оптична мікроскопія);
- растрова електронна мікроскопія;
- рентгенівський фазовий аналіз;
- дослідження механічних властивостей;

Методом вакуумного спікання було отримано зразки сплаву ВК8. Дослідження структури та ряду фізико-механічних властивостей дало змогу провести математичну оптимізацію режимів спікання.

Оптимізація режимів спікання показало, що при проведенні достатньої кількості експериментів, є змога оптимізувати режими спікання для конкретної установки. Так, в нашому випадку, без додаткових капіталовкладень вдалося тільки завдяки розрахункам зменшити умовний розмір зерна на 4,3 % а периметр на 5,3% при не значному зменшенні твердості, що рівне 0,1 %. Таким чином, вдалося отримати оптимальні значення й інших фізико-механічних властивостей.

ABSTRACT

The work contains: p. – 127, fig. – 30, table. – 38, lit. – 52.

HARD ALLOYS, OPTIMIZATION OF SINTERING MODES, CRACK PROPAGATION MODEL.

This paper provides a literature review of the state of the theory and the process of obtaining products based on tungsten carbide.

The subject of the research is tungsten carbide-based solid alloys.

The purpose of the work is to identify certain dependencies that affect a number of mechanical properties and structure of the samples according to the specified sintering modes and as a result - to build a mathematical model for the optimization of the sintering modes.

Research methods:

- metallographic analysis (optical microscopy);
- scanning electron microscopy;
- X-ray phase analysis;
- study of mechanical properties;

Vacuum sintering produced samples of VK8 alloy. The study of the structure and a number of physical and mechanical properties made it possible to perform mathematical optimization of sintering modes.

The optimization of the sintering modes has shown that when sufficient experiments are performed, it is possible to optimize the sintering modes for a particular installation. So, in our case, without additional capital investments it was possible only due to calculations to reduce the conditional grain size by 4.3% and the perimeter by 5.3% with a not insignificant decrease in hardness, which is 0.1%. Thus, it was possible to obtain optimal values of other physical and mechanical properties.

РЕФЕРАТ

Работа содержит: стр. – 127, рис. – 30 табл. – 38, лит. – 52.

МОДЕЛЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТРЕЩИНЫ, ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ СПЕКАНИЯ, ТВЕРДЫЕ СПЛАВЫ.

В данной работе изложен литературный обзор состояния теории и процесс получения изделий на основе карбида вольфрама.

Объектом исследования в диссертации являются твердые сплавы на основе карбида вольфрама.

Целью работы является выявление определенных зависимостей, влияющих на ряд механических свойств и структуру образцов в соответствии с заданными режимами спекания и как результат – построение математической модели оптимизации режимов спекания.

Методы исследования:

- металлографический анализ (оптическая микроскопия);
- растровая электронная микроскопия;
- рентгеновский фазовый анализ;
- исследования механических свойств;

Методом вакуумного спекания было получено образцы сплава ВК8. Исследование структуры и ряда физико-механических свойств позволило провести математическую оптимизации режимов спекания.

Оптимизация режимов спекания показало, что при проведении достаточного количества экспериментов, есть возможность оптимизировать режимы спекания для конкретной установки. Так, в нашем случае, без дополнительных капиталовложений удалось только благодаря расчетам уменьшить условный размер зерна на 4,3%, а периметр на 5,3% при незначительном уменьшении жесткости, равное 0,1%. Таким образом, удалось получить оптимальные значения и других физико-механических свойств.

ЗМІСТ

| | |
|---|----|
| ВСТУП..... | 13 |
| 1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД | 14 |
| 1.1 Загальний опис матеріалів, що використовуються для виготовлення виробів, котрі працюють в ударно-хвильових умовах | 14 |
| 1.2 Загальна характеристика твердих сплавів..... | 15 |
| 1.3 Технічні характеристики твердого сплаву ВК8 та монокристалу карбіду вольфраму | 16 |
| 1.4 Сфери застосування твердих сплавів..... | 19 |
| 1.5 Сфера застосування ВК8 та його аналогів | 21 |
| 1.6. Методи регулювання твердості в твердих сплавах | 22 |
| 1.6.1 Традиційні методи регулювання твердості..... | 22 |
| 1.6.2 Вольфрамокобальтові тверді сплави з наночастинками монокарбіду вольфраму | 24 |
| 1.6.3 Тверді сплави WC-Co, леговані карбідом тантала | 26 |
| 1.6.4 Формування твердого сплаву ВК8 з використанням порошку карбіду вольфраму, синтезованого за механохімічною технологією | 26 |
| 1.7 Особливості спікання твердих сплавів | 30 |
| 1.8 Аналіз існуючих математичних моделей на стиск твердих сплавів..... | 32 |
| 1.8.1 Модель Гурсо | 32 |
| 1.8.2 Математична модель динамічної міцності при ударному навантаженні | 35 |
| 1.8.3 Математична модель межі пружності твердого сплаву WC-Co при стискуванні..... | 39 |
| 1.8.4 Одновимірна модель стискування..... | 40 |
| 1.9 Висновки та постановка завдання дослідження | 44 |
| 2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ | 46 |
| 2.1 Методика проведення експерименту | 46 |
| 2.2 Вихідний матеріал..... | 46 |

| | |
|---|-----|
| 2.3 Підготовка зразків до спікання..... | 47 |
| 2.4 Процес спікання зразків | 48 |
| 2.5 Визначення густини | 49 |
| 2.6 Дослідження твердості | 50 |
| 2.7 Дослідження мікроструктури | 51 |
| 2.8 Хімічний аналіз | 59 |
| 2.9 Дослідження ударної в'язкості | 60 |
| 2.10 Дослідження межі міцності на згин | 61 |
| 2.11 Розрахунок абсолютної міцності..... | 62 |
| 2.12 Оптимізація режимів спікання..... | 64 |
| 2.12.1 Регресійна модель | 64 |
| 2.12.2 Окремі блоки програми по генерації будови | 67 |
| 2.13 Модель розповсюдження тріщини | 70 |
| 2.13.1 Математична модель побудови структури..... | 70 |
| 2.13.2 Математична модель проходження тріщини | 72 |
| 3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ | 81 |
| 3.1 Дослідження структури | 81 |
| 3.2 Дослідження механічних властивостей | 88 |
| 3.3 Дослідження оптимізації режимів спікання..... | 89 |
| 3.4 Дослідження моделі поведінки тріщини | 90 |
| 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ | 92 |
| 4.1 Небезпечні і шкідливі виробничі фактори | 92 |
| 4.2 Безпечність технологічного процесу | 93 |
| 4.3 Безпечність виробничого обладнання..... | 95 |
| 4.4 Заходи та засоби безпеки..... | 96 |
| 5 ЕНЕРГЕТИЧНИЙ РОЗДІЛ | 98 |
| 6 ОРГАНІЗАЦІЙНИЙ РОЗДІЛ..... | 102 |
| 6.1 Розрахунок чисельності виробничих робітників та їх заробітної плати ... | 102 |
| 6.2 Визначення фондів заробітної плати | 104 |
| 7 ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ | 106 |

| | |
|--|-----|
| 7.1 Науково-технічна актуальність | 106 |
| 7.2 Розрахунок витрат на проведення НДР | 107 |
| 7.3 Витрати на оплату праці..... | 107 |
| 5.4 Єдиний соціальний внесок..... | 109 |
| 5.5 Науково-технічна ефективність НДР..... | 110 |
| 8 РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ..... | 114 |
| 8.1 Актуальність..... | 114 |
| 8.2 Опис ідеї проекту | 114 |
| 8.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту..... | 115 |
| 8.4 Розроблення ринкової стратегії проекту | 117 |
| 8.5 Аналіз ринку збуту товару | 118 |
| 8.6 Розробка логотипу..... | 118 |
| ВИСНОВКИ..... | 120 |
| CONCLUSIONS | 121 |
| ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ..... | 122 |

ВСТУП

Не дивлячись на те, що тверді сплави використовують вже досить давно, а самій промисловості скоро виповниться майже 100 років, вони до сих пір займають лідируючі позиції в багатьох сферах діяльності. Тверді сплави на разі масово використовують у тих сегментах виробництва, де необхідні високі показники механічних властивостей, таких як: твердість, міцність, зношуваність при високих температурах чи високій інтенсивності робіт. Конкретними прикладами використання твердих сплавів є використання їх для виробництва: різального та гірничо-видобувного інструменту, частини вимірювальних приладів, для зносостійких підшипників та в якості зносостійкого напилення. Використовуються тверді сплави й у військовій галузі. З них виготовляють ракетні сопла, бронежилети високих рівнів захисту від куль типу 5,45 мм та 7,62 мм, бронепластины для техніки, бронебійні снаряди для артилеристських та танкових снарядів, для бронебійних патронів стрілецької зброї та для окремих відповідальних деталей.

В даний час, постає гостро питання, про власне виготовлення необхідних та дефіцитних виробів з твердих сплавів. Особливу долю уваги приділяється саме таким характеристикам, як твердість та ударна в'язкість.

Тому оптимізація процесу виготовлення виробів навіть за класичної технології є актуальною задачею.

1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

1.1 Загальний опис матеріалів, що використовуються для виготовлення виробів, котрі працюють в ударно-хвильових умовах

Людство вже давно потребує вироби, які б змогли виконувати свої функції при високих швидкостях роботи та високій інтенсивності, будь-то короткотривалі чи довготривалі. З кінця 19 століття та початку 20 століття розпочався бум на матеріали, що зможуть вдовольнити потребу людства за умовах що генеруються ударно-хвильовим навантаженням. Проте основною альтернативою таких матеріалів є бронезахист. Бронезахист може знаходитися як на людині чи техніці, так і бути стаціонарним. Найпопулярнішими матеріалами під час обранні матеріалу захисту є наступні: металокерамічні, бронесталі, кевлар та балістичний поліетилен.

Оскільки фізичні властивості кевлару і балістичного поліетилену не дають змоги використовувати їх для виготовлення «інструментів», тому проаналізуємо більш детально металокераміку і бронесталі.

Металокераміка — штучний матеріал, що є гетерогенною композицією металів або сплавів з неметалами [1].

Металева фаза металокерамічних матеріалів може містити Cr, Ni, Al, Fe, Co, Ti, Zr та їх сплави, а до самої керамічної фази відносять [1]-[2]:

- оксиди (Al_2O_3 , Cr_2O_3 , SiO, SiO_2 , ZrO_2);
- карбіди (SiC, TiC, WC);
- борида (Cr_2B_2 , TiB_2 , ZrB_2);
- силіциди (MoSi);
- інше.

Зміст керамічної складової в металокераміці в залежності від її типу змінюється в широких межах від 15 % до 85 % [2].

В існуючих науково-практичних дослідженнях не має чіткого наукового визначення поняття бронесталі. Але їх назва дає можливість зрозуміти їх призначення. Прикладом таких сталей можуть слугувати: 45Х2НМФБА [3] чи сталь *Millux Protection 500*, що широко використовується під час виготовлення

вітчизняних БТР-4 [4].

Враховуючи специфіку умов ударно-хвильового навантаження, можна виділити наступні властивості, для яких необхідний додатковий контроль: твердість, ударна в'язкість, теплопровідність, виділення та поглинання енергії, густина, середній умовний розмір зерен, об'ємна доля твердої фази, в'язкість руйнування, модуль пружності та межі міцності на стиск та на згин.

1.2 Загальна характеристика твердих сплавів

Тверді сплави – це зносостійкі матеріали з великою твердістю. Властивості цих сплавів мало залежать від температури аж до 1150 °С. У їх склад входять такі тугоплавкі елементи, як: вольфрам, титан, молібден, хром та ін. [5].

Ці матеріали складаються з зерен тугоплавкого з'єднання по типу: карбіду, нітриду, карбонітриду, – і легкоплавкого сполучного металу на основі кобальту чи нікелю, також за необхідністю ці з'єднання легують, в залежності від марки твердого сплаву, що застосовується. Так, до основних легуючих матеріалів відносять: тантал, титан, молібден, ванадій та інші елементи. Тверді сплави можна отримати використавши метод порошкової металургії шляхом приготування твердосплавних порошкових сумішей, пресування виробів і їх спікання в присутності рідкої фази [6]-[7].

Тверді сплави можна поділити на три групи в залежності від складу карбідної фази: вольфрамові (ВК), титановольфрамові (ТК), титанотанталовольфрамові (ТТК). Також, в залежності від розміру зерен класифікують: нанорозмірні, ультрадисперсні, особливо мілкозернисті, середньозернисті, крупнозернисті, та особливо крупнозернисті.

Структура вольфрамових твердих сплавів складається з зерен карбіду вольфраму (WC), зцементованих кобальтом. Промисловість випускає тверді сплави, що містять у собі від 3 % до 30 % кобальту. Слід зауважити, що із збільшенням вмісту кобальту в твердому сплаві збільшується його міцність, але падає твердість. Із зниженням твердості падає й зносостійкість.

1.3 Технічні характеристики твердого сплаву ВК8 та монокристалу карбіду вольфраму

До основних характеристик сплаву ВК8 відносять наступні характеристики за ГОСТ 3882–74 [8]:

- питома вага – 14800 кг/м^3 ;
- межа міцності – 1666 МПа ;
- твердість HRa – 88;
- коефіцієнт тертя у воді – 0,01;
- в'язкість – 35 кДж/м^2 ;
- тиск при обробці – 30 МПа ;
- теплостійкість – $800 \text{ }^\circ\text{C} - 1000 \text{ }^\circ\text{C}$;
- теплопровідність – $50,2 \text{ Вт/мК}$.

Основними властивостями твердих сплавів, які визначаються за стандартними методиками, затвердженими Міжнародною Організацією Стандартів (ISO) [9] є:

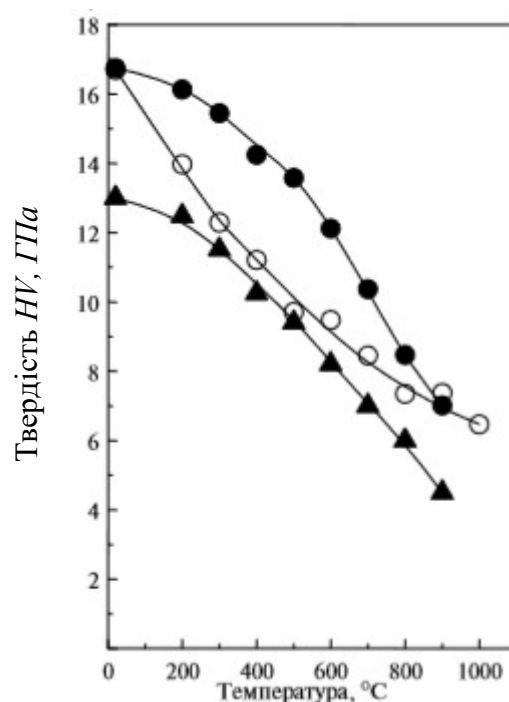
- густина (метод визначення - ISO 3369).
- твердість (метод визначення - ISO 3878).
- межа міцності при згині (метод визначення - ISO 3327).
- комплекс експлуатаційних властивостей (групи застосування ISO T513).

Карбід вольфраму WC має гексагональну структуру з параметрами кристалічної решітки $a = 2,906 \text{ Å}$ і $c = 2,837 \text{ Å}$ [10].

WC – це тугоплавка сполука, в якій поєднуються висока твердість $HV \approx 17 \text{ ГПа}$, високий модуль Юнга $E \approx 720 \text{ ГПа}$ і висока для тугоплавких сполук характеристика пластичності $\delta_H \approx 0,82$ (пластичність, що визначається методом індентування). Характеристика пластичності δ_H визначається як відношення ступеня пластичної деформації до загальної деформації при індентуванні і може характеризувати пластичність матеріалів, які руйнуються крихко при стандартних

механічних випробуваннях [10].

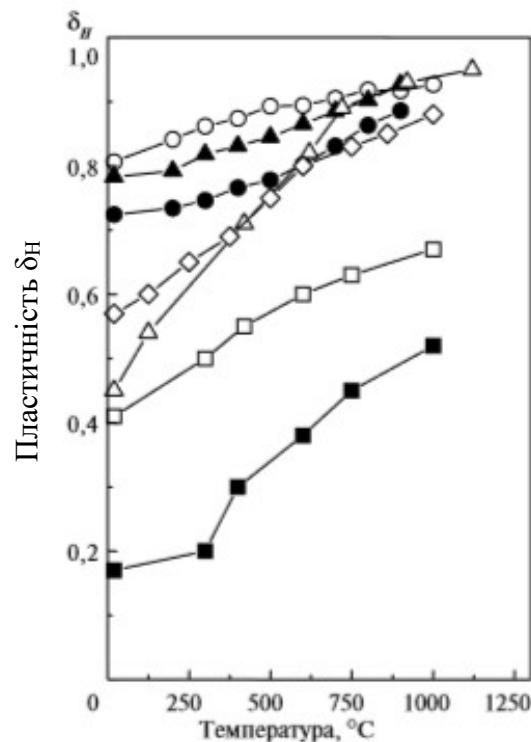
Як видно з рисунку 1.1, температурна залежність твердості HV для WC має аналогічний характер, як і для інших тугоплавких сполук: зростання твердості при зниженні температури по експоненційній залежності при високих температурах і лінійною залежністю при низьких температурах. Енергія активації руху дислокацій в WC $U \approx 1,8 \text{ eV}$, що близько до енергії активації руху дислокацій в Si, Ge і інших ковалентних кристалах і тугоплавких сполуках. Температурна залежність HV для сплавів WC-Co має дещо інший характер [10].



1 – WC(○); 2 – WC-6Co(●); 3 – WC-15Co(▲)

Рисунок 1.1 – Температурна залежність твердості монокристалу WC в порівнянні з твердістю твердих сплавів [10]

На рисунку 1.2 характеристика пластичності δ_H WC порівняна з δ_H інших тугоплавких сполук у широкому температурному інтервалі. Хоча при кімнатній температурі для WC δ_H менше критичного значення 0,9 при якому проявляється пластичність під час випробування на розтяг. Проте δ_H WC істотно вище, ніж TiC, V_4C і NbC [10].



1–WC(○); 2 – WC-6Co(◆); 3 – WC-15Co(▲); 4 – TiC(Δ), 5 –B₄C(□); 6 – NbC(◇);
7 – B₄C+40ZrB₂(■)

Рисунок 1.2 – Температурна залежність характеристики пластичності δ_H монокристалу WC в порівнянні з δ_H інших тугоплавких сполук [10]

Під час локального навантаження індентором навколо відбитка твердості в монокристалі WC спостерігаються лінії ковзання і відсутні радіальні мікротріщини (рис. 1.3). Підвищена пластичність WC під час локального навантаження забезпечує більшу ефективність його роботи в кобальтової зв'язці в порівнянні, наприклад, з TiC, ZrC і NbC, незважаючи на те, що монокристали цих карбідів мають при кімнатній температурі більш високу твердість, ніж WC ($HV = 22 \text{ ГПа}$ і для TiC $HV = 24 \text{ ГПа}$ для ZrC і NbC). Завдяки пластичності WC під час локального навантаження, концентрація напружень в голові дислокаційних нагромаджень в кобальтової зв'язці може частково релаксувати в частці WC, не викликаючи утворення тріщин. У зв'язку з вище викладеним, успішна заміна WC в твердих сплавах на інші більш тендітні (хоча і більш тверді) тугоплавкі сполуки є малоімовірною. Як видно з аналізу рисунку 1.2, значення δ_H твердих сплавів при

20 °C трохи нижче, ніж монокристалла WC (внаслідок зменшення модуля Юнга), проте істотно вище, ніж в більшості тугоплавких сполук [10].

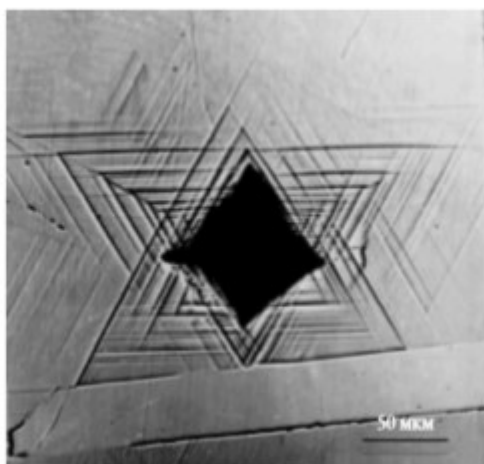


Рисунок 1.3 – Лінії ковзання навколо відбитку індентора в монокристалі WC при навантаженні на індентор 50 Н [10]

Методом наноіндентування підтверджено, що зерно WC в твердому сплаві має трохи більш низькі значеннями HV і E , ніж монокристал WC. Однак його характеристика пластичності δ_H навіть трохи вище, ніж в монокристалі. При цьому при навантаженні на індентор $P = 5 \text{ мН}$ значення нанотвердості дорівнювала $H = 39,8 \text{ ГПа}$, тобто більш ніж в 2 рази перевищувала макротвердість (див. Рис. 1.1).

Показано також, що в області нанотвердості при подальшому зниженні навантаження P має спостерігатися різке підвищення H .

1.4 Сфери застосування твердих сплавів

Тверді сплави через їх унікальні властивості досить широко використовуються в усіх сферах промисловості, де необхідні високі показники міцності, твердості, теплостійкості та інше.

На даний час кількість марок твердих сплавів, що широко використовуються в вітчизняному та світовому машинобудуванні, може бути представлена наступною таблицею 1.1 [11].

Таблиця 1.1 – Характеристики твердих сплавів різних марок [11]

| Марка сплаву | WC, % | TiC, % | TaC, % | Co, % | Міцність на згин, МПа | Твердість, HRa | Густина, г/см ³ | Теплопровідність, Вт/(м×°C) |
|--------------|-------|--------|--------|-------|-----------------------|----------------|----------------------------|-----------------------------|
| BK2 | 98 | - | - | 2 | 1200 | 91,5 | 15,1 | 51 |
| BK3 | 97 | - | - | 3 | 1200 | 89,5 | 15,3 | 50,2 |
| BK4 | 96 | - | - | 4 | 1550 | 89,5 | 15,2 | 50,3 |
| BK6 | 94 | - | - | 6 | 1550 | 88,5 | 15,0 | 62,8 |
| BK10 | 90 | - | - | 10 | 1800 | 87,0 | 14,6 | 67,0 |
| BK15 | 85 | - | - | 15 | 1900 | 86,0 | 14,1 | 74,0 |
| BK20 | 80 | - | - | 20 | 2000 | 84,5 | 13,8 | 81,0 |
| BK25 | 75 | - | - | 25 | 2150 | 83,0 | 13,1 | 83,0 |
| BK30 | 70 | - | - | 30 | 2400 | 81,5 | 12,7 | 85,0 |
| T5K10 | 85 | 6 | - | 9 | 1450 | 88,5 | 13,1 | 20,9 |
| T5K12 | 83 | 5 | - | 12 | 1700 | 87,0 | 13,5 | 21 |
| T15K6 | 79 | 15 | - | 6 | 1200 | 90,0 | 11,5 | 12,6 |
| T30K4 | 66 | 30 | - | 4 | 1000 | 92 | 9,8 | 12,57 |
| TT8K6 | 84 | 8 | 2 | 6 | 1350 | 90,5 | 13,3 | - |

Ці сплави широко використовуються як під час виробництва окремих деталей необхідних авіабудуванню, так і під час виготовлення різальних інструментів.

В залежності від групи твердих сплавів наведемо короткий перелік марок твердих сплавів та їхнього застосування в промисловості.

В машинобудуванні вже давно чітко сформовані рекомендаційні таблиці, в котрих чітко вказано використання того чи іншого матеріалу в різних різальних інструментах, що явною мірою залежить від умов, в котрих знаходиться інструмент під час роботи.

Приклади сфери застосування твердих сплавів в залежності від інструменту та типу обробки представлені в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Сфери застосування твердих сплавів [11]

| Марка | Застосування |
|--------|---|
| ВК6С | Матриці для синтезу синтезованих алмазів. |
| ВК15 | Відрізні ножі та опорні пластини. |
| ВП322 | Чорнове фрезерування та точіння штамповок, поковок із корозійностійких, жароміцних нікель-кобальтових сплавів, титанових сплавів. |
| ВП3115 | Як покриття для ріжучого інструменту. |
| МС121 | Відновлення зношених коліс залізничного транспорту. |
| МС2215 | Як покриття для ріжучого інструменту. |
| Т5К10 | Чорнове та фасонне точіння, стругання та фрезерування. |
| Т30К4 | Чистове точіння, нарізання різьби. |
| ТС1Т | Як покриття для ріжучого інструменту, якому необхідна надійність в несприятливих умовах . |

1.5 Сфера застосування ВК8 та його аналогів

Із основних іноземних аналогів твердого сплаву ВК8 можна виділити наступні [12]:

- чеські *CSN, G1.1, G2*;
- польські *PN, H30*;
- угорські *MSZ, DR30, DR40*;
- болгарська *BDS*;
- шведські *SS, MC241*;
- німецькі *DIN, WNr, HG30, HG40*.

Основним застосуванням ВК8 залишається матеріалообробка. Твердий сплав ВК8 використовується під час виготовлення ріжучого інструменту. Є два варіанти його використання: у вигляді пластин, які можуть мати різні варіанти кріплення; як цільний інструмент. Основними інструментами, для яких використовують цей сплав є: фрези (черв'ячні, кінцеві, торцеві, дискові та інші), свердла (спіральні,

гарматні, рушничні, ежекторні, центрувальні та інші) та різці (прохідні, підрізні, відрізні, різьбонарізні, розточувальні та інші). Сфери застосування ВК8 та його аналогів представлені в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Сфери застосування ВК8 та його аналогів за [11]

| Сплав | Сфера застосування |
|-------|---|
| ВК8 | Чорнове: стругання, фрезерування, свердління, розсвердлювання, зенкування сірого чавуну, кольорових металів та їх сплавів та неметалевих матеріалів. Якщо в якості бурового інструменту: обертальне буріння шпурів, геологорозвідувальних, експлуатаційних та вибухових свердловин в тріщинуватих абразивних породах з коефіцієнтом міцності за шкалою Протод'яконова до $f=8$; |
| ВК8В | ударно-поворотне, ударно-обертальний і обертально-ударне буріння шпурів і свердловин в міцних гірських породах з коефіцієнтом міцності за шкалою Протод'яконова до $f=14$; зарубка міцних кам'яного вугілля з включенням твердих порід; обробки гранітів і подібних по твердості гірських порід. |
| ВК8ВК | шарошечне буріння геологорозвідувальних, експлуатаційних та вибухових свердловин в міцних і дуже міцних абразивних гірських породах з коефіцієнтом міцності за шкалою Протод'яконова до $f=18$. |
| ВК8КС | ударно-поворотне, ударно-обертальне і обертально-ударне буріння шпурів і свердловин в міцних гірських породах з коефіцієнтом міцності за шкалою Протод'яконова до $f=14$. |

1.6. Методи регулювання твердості в твердих сплавах

1.6.1 Традиційні методи регулювання твердості

Як зазначено в [13], високу щільність можна отримати при низькому вмісті

зв'язки, використанні карбіду вольфраму зі значним вмістом вуглецю і шляхом гарячого пресування деталі.

Однак, твердий сплав виявляється дуже крихким при малому вмісті зв'язки і високому вмісті W_2C , а також при наявності подвійних карбідів. Такі тверді, крихкі та з особливо високою щільністю тверді сплави, можна застосовувати тільки для малогабаритних сердечників. Сердечники більших розмірів потрібно виготовляти зі звичайного WC з 6 % C і з вмістом зв'язки не менше 3 % (рекомендація від 9 % до 13 %).

Твердість можна регулювати різними методами, проте якщо говорити власне про традиційні методи, то основним методом, на думку фахівців [14], є змінювання вмісту зв'язки або ступінь дисперсності карбідної і сполучною фаз. За даними Мейєра і Ейлендера, можна шляхом зменшення розміру зерен WC-фази від 2-5 мкм до 0,5-1 мкм підвищити твердість сплавів WC-Co з 89-90 до 92-93 HRA. І навпаки, в результаті занадто високої температури або занадто великої тривалості спікання утворюються великі карбідні кристали. При цьому очевидно, що знижується твердість і зносостійкість твердих сплавів з такими великими зернами [13].

Підвищити твердість металокерамічних твердих сплавів можна також і іншим способом. Цей спосіб базується на введенні твердих розчинів карбідів в шихту замість чистих карбідів. Ізоморфні карбіди металів груп IVa та Va періодичної системи (TiC, ZrC, VC, NbC та TaC) характеризуються повною взаємною розчинністю.

Виключенням є лише твердий розчин карбіду ZrC-VC.

Карбід гафнію поводить себе аналогічно карбіду цирконію. В системі NiC-VC розчинність обмежена, проте карбіди металів груп IVa та Va добре розчиняють карбіди металів групи VIa. Проте карбіди металів групи VIa або зовсім не розчиняють карбіди груп IVa і Va, або в незначній кількості. В структурі твердих сплавів WC-TiC-Co або WC-NiC-TaC(NbC)-Co утворюється поряд зі сполучною γ та α фазою (чистий WC чи твердий розчин вкрай незначних кількостей TiC-TaC-NbC в WC) також і твердий розчин TiC-WC або TiC-TaC (NbC) – WC (β -фаза). Твердий розчин бета при цьому, як правило, кілька твердіше, ніж альфа фаза.

Найбільша твердість твердих розчинів при цьому виходить, як правило, при дотриманні деякого певного співвідношення $WC : TiC$. Це явище спостерігається також у твердих розчинів Mo_2C-TiC .

Межа міцності при згинанні у свою чергу у великій мірі залежить від вмісту зв'язки. Тому при однаковому вмісті зв'язки межу міцності при згині можна змінювати, змінюючи ступінь дисперсності частинок карбиду чи сполучною фази, а також режиму спікання. У твердих сплавах $WC-TiC-Co$ наявність $TaC (NbC)$ у фазі твердого розчину помітно підвищує межу міцності при згинанні.

1.6.2 Вольфрамокобальтові тверді сплави з наночастинками монокарбиду вольфраму

Дослідження взаємодії наночастинок монокарбиду вольфраму між собою та з компонентами порошкових сумішей на різних етапах формування вольфрамокобальтових твердих сплавів проведено авторами [14]. Ще одним із важливих результатів дослідження вказаних вище авторів є встановлення факту, що введення наночастинок монокарбиду вольфраму в порошкову суміш $WC-15Co$ в кількості від 1 % до 5 % від маси сплаву, знижує температуру рідкофазного спікання і забезпечує формування дрібнозернистої структури. В результаті зменшення розміру зерна зміцнюючої фази сприяє підвищенню мікротвердості сплавів від 11 % до 18 %, межу міцності на стиск від 7 % до 18 %, межу міцності на згин від 20 % до 37 % [14].

Після шести годин перемішування з частотою обертання 300 об/хв дослідниками [14] була досягнута найкраща однорідність сумішей. Для компактування порошкових сумішей вони використовували одноосьове пресування.

Серед важливих результатів цього дослідження варто також відмітити, що при тиску 500 МПа і швидкості 10 мм/хв була досягнута максимальна міцність порошкових компактів. Наявність наночастинок монокарбиду вольфраму в складі порошкових сумішей сприяла високій щільності. Порошкові компакти, що містять

наночастинки монокарбіду вольфраму, спікалися рідкофазно при температурі 1370 °C та з ізотермічною витримкою 30 хвилин.

Зазначимо, що наявність наночастинок монокарбіду вольфраму в порошкових сумішах призводить до істотної зміни процесу спікання частинки відбувається вже при температурі 1100 °C, яка нижча за температуру рідкофазного спікання.

Введення наночастинок монокарбіду вольфраму в твердосплавні суміші в кількості від 1 % до 5 % від маси сплаву і зменшення температури спікання, призводить до значного подрібнення структури сплаву. Середній розмір зерна монокарбіду вольфраму в модифікованому твердому сплаві склав 2 *мкм*, при мінімальному розмірі зерен 300 *нм*.

Варто відмітити, що менша структура твердого сплаву і підвищена твердість, припускають поліпшення його триботехнічних властивостей. Триботехнічні випробування твердих сплавів в умовах тертя об закріплені частки абразиву показали, що введення наночастинок монокарбіду вольфраму в кількості 5 % від маси сплаву дозволяє підвищити зносостійкість на 30 %. Високі значення міцності і зносостійкості дозволяють використовувати вольфрамокобальтові тверді сплави, спечені з добавками наночастинок монокарбіду вольфраму, як інструмент для обробки металів тиском і швидкозношуваних деталей вимірювального інструмента.

Отже, проаналізувавши результати дослідження, викладені в [14], можна зробити наступні висновки, що завдяки додаванню наночастинок монокарбіду вольфраму в порошкову суміш ВК15 в кількості від 1 % до 5 % від маси сплаву можна по-перше, знизити температуру рідкофазного спікання і по-друге, забезпечити формування дрібнозернистої структури. Це в свою чергу сприяє підвищенню мікротвердості від 11 % до 18 %, межі міцності при стисненні від 7 % до 18 %, межі міцності при згині від 20 % до 37 %. Завдяки такому підвищенню міцності вдається підвищити зносостійкість твердих сплавів до 30 %.

1.6.3 Тверді сплави WC-Co, леговані карбідом тантала

Незважаючи на те, що легування твердих сплавів танталом вже давно не нова технологія та широке застосування виробів з твердих сплавів WC-Co, що містять карбід танталу, думки різних дослідників щодо впливу його невеликих (1% - 5%) добавок на властивості цих матеріалів не однозначні, а їх точки зору на механізм такого впливу значно різняться, тобто можна сказати, що однозначної відповіді немає. Проте аналіз вітчизняної та зарубіжної літератури з даного питання свідчить про невгамовний інтерес фундаментальної і прикладної науки до цієї теми. Питання про перевагу сплавів WC-Co з карбідом танталу, що з'явилися за кордоном в 1930-1940-і роки XX століття, а в нашій країні в кінці 1950-х років, в порівнянні зі сплавами без добавки до цього часу залишається дискусійним і до кінця не вивченим, навіть, зараз в 2019 році [15].

В роботі [16] досліджені фізичні, механічні та ріжучі властивості сплаву WC- 8 % з добавкою 3 % TaC при обробці сталі та чавуну. Авторами показано переваги запровадження цього з'єднання. Вплив же карбіду танталу на твердість, міцність при згинанні та ударну в'язкість сплавів WC-Co (4 % і 15 % Co) та інших властивостей вивчено в [17].

Властивості і умови роботи твердих сплавів WC-Co (6 % і 10% Co) з добавкою TaC: твердість $HV = 17,5 \div 20,0 \text{ ГПа}$, $\sigma_{\text{згин}} = 1700 \div 1850 \text{ Н/мм}^2$, $K_{Ic} = 12 \div 14 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$. Свердла зі сплавів BK6 «СМ» і BK10 «СМ» при безстружковій обробці металів працюють в 2 рази довше, ніж аналоги, що не містять TaC.

1.6.4 Формування твердого сплаву BK8 з використанням порошку карбіду вольфраму, синтезованого за механохімічною технологією

Основний компонент твердого сплаву BK8 - карбід вольфраму, був отриманий авторами робота [18] механохімічно синтезом на вібраційній млині. Морфологія ультрадисперсного порошку карбіду вольфраму показана на рисунку 1.4. Синтез карбіду вольфраму здійснювали відповідно до реакції [18]:

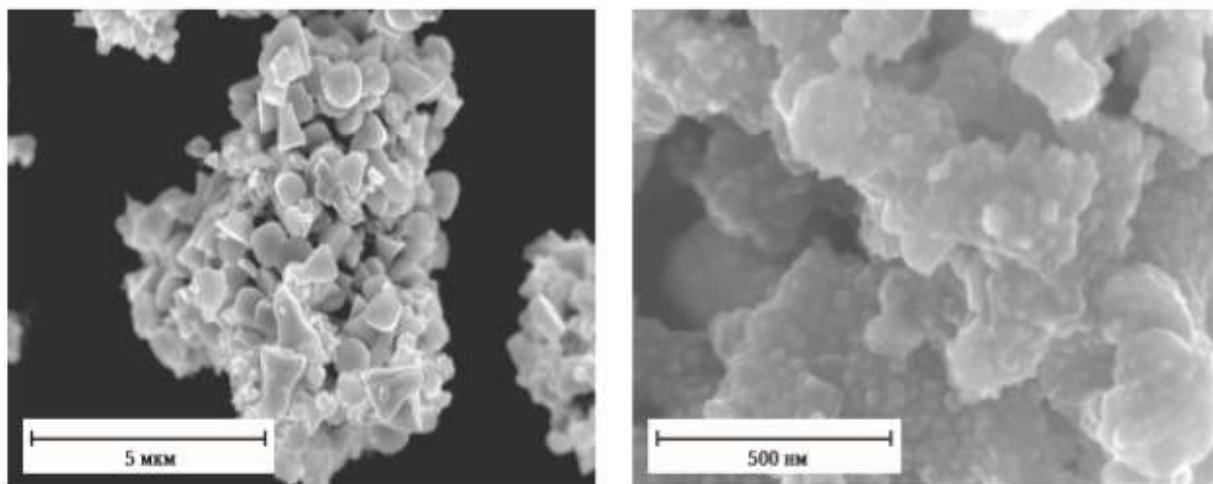
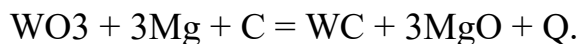


Рисунок 1.4 – Морфологія порошку карбіду вольфраму [19]

Авторами використовувався оксид вольфраму кваліфікації х. ч. і магній чистотою 99,95 %. Як вуглець матеріалу застосовували аморфний вуглець.

Ультрадисперсний порошок кобальту ПК-1У за ГОСТ 9721 розмірністю 3 мкм – 7 мкм і щільністю 8,93 г/см³ використовувася в якості зв'язки для створення твердосплавних суміші.

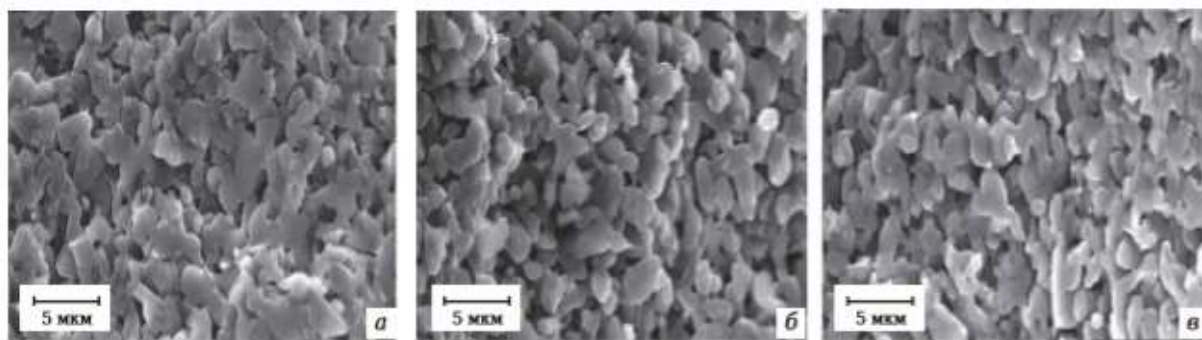
Спінання твердосплавних композиції ВК8 здійснювалося авторами [19] в високотемпературній вакуумній печі «Nabertherm VHT 100/22-МО», виробництва Німеччини, за трьома експериментальним режимам.

Режим І: попереднє спінання з оберненою подачею водню, температура нагріву 930 °С, тривалість нагріву 147 хв, витримка 60 хв, остаточне спінання при 1410 °С у вакуумі 1·10⁻⁴ мбар протягом 85 хв.

Режим ІІ: спінання у вакуумі при 1400 °С при максимальному для даної печі вакуумі 1·10⁻⁵ мбар протягом 155 хв.

Режим ІІІ - ізостатичне гаряче пресування в вакуумі на лабораторному пресі гарячого ізостатичного пресування фірми AIP, США, при 1430 °С, тиску 1,3 т/см² і витримці 5 хв.

Мікроструктура експериментального твердого сплаву ВК8 представлена на рисунку 1.5.



а – спікання за змішаним режимом; б – спікання у вакуумі;
в – ізостатичне гаряче пресування

Рисунок 1.5 – Мікроструктура експериментального твердого сплаву ВК8 [18]

Серед важливих результатів своєї роботи автори [18] відзначають наступне: порівняння мікроструктури твердого сплаву ВК8, що отримані при використанні трьох експериментальних режимах спікання (рис. 1.3) демонструє, що найбільш дисперсну, розвинену структуру отримано при ізостатичному гарячому пресуванні. При цьому середній умовний розмір частинок карбиду вольфраму становить 1,7 мкм (табл. 1.4).

В структурі сплаву, який спікався за змішаним режимом, можна спостерігати порівняно крупні зерна частинок карбиду вольфраму, середній умовний розмір котрих становить – 2,22 мкм.

Варто зазначити, що під час проведення вказаного дослідження автори використовували як твердий сплав виготовлений із комерційної твёрдосплавної суміші, так і власного виробництва. Комерційні суміші при будь-якому режимі спікання в середньому мали розмір на 10 % більші, ніж у експериментальних сумішей. Тверді сплави виготовленні за експериментальними режимами мають меншу густину аніж комерційний продукт, при цьому, твердість була вища на 14 % – 18 % [18].

Всі дані експерименту було занесено авторами [18] в порівняльну таблицю.

Таблиця 1.4 демонструє порівняння комерційного продукту з експериментальним (експериментальний продукт у чисельнику, комерційний – знаменнику).

Таблиця 1.4 – Порівняльна таблиця експериментальних сумішей [18] та комерційних продуктів

| Характеристики | Режими спікання | | |
|---|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| | I | II | III |
| Об'ємна доля твердої фази, % | $\frac{84 \pm 1,7}{83,9}$ | $\frac{85 \pm 1,2}{83,1 \pm 1,2}$ | $\frac{89 \pm 1,1}{86,1 \pm 1,1}$ |
| Середній умовний розмір частинок карбіду вольфраму, мкм | $\frac{2,22 \pm 0,03}{2,41 \pm 0,03}$ | $\frac{2,10 \pm 0,03}{2,17 \pm 0,03}$ | $\frac{1,7 \pm 0,02}{1,9 \pm 0,02}$ |
| Середня умовна товщина прошарку кобальту, мкм | $\frac{0,74 \pm 0,04}{0,77 \pm 0,04}$ | $\frac{0,54 \pm 0,04}{0,63 \pm 0,04}$ | $\frac{0,34 \pm 0,03}{0,45 \pm 0,03}$ |
| Густина, 10^{-3} , кг/м ³ | $\frac{14,5 \pm 0,04}{14,6 \pm 0,04}$ | $\frac{14,6 \pm 0,04}{14,7 \pm 0,04}$ | $\frac{14,9 \pm 0,04}{15,0 \pm 0,04}$ |
| Твердість, ГПа | $\frac{13,7 \pm 0,7}{11,2 \pm 0,7}$ | $\frac{14,4 \pm 0,7}{12,3 \pm 0,7}$ | $\frac{18,3 \pm 0,7}{15,4 \pm 0,7}$ |
| Модуль пружності, 10^{-4} МПа | $\frac{61,0 \pm 1}{60,0 \pm 1}$ | $\frac{61,5 \pm 1}{60,5 \pm 1}$ | $\frac{63,0 \pm 1}{61,5 \pm 1}$ |
| Межа міцності на згин, ГПа | $\frac{2,24 \pm 0,1}{2,12 \pm 0,1}$ | $\frac{2,64 \pm 0,1}{2,37 \pm 0,1}$ | $\frac{2,97 \pm 0,1}{2,74 \pm 0,1}$ |
| Межа міцності на стиск, ГПа | $\frac{4,5 \pm 0,2}{4,3 \pm 0,2}$ | $\frac{4,7 \pm 0,2}{4,5 \pm 0,2}$ | $\frac{4,9 \pm 0,2}{4,7 \pm 0,2}$ |
| Ударна в'язкість, кДж/м ² | $\frac{35 \pm 2}{34 \pm 2}$ | $\frac{62 \pm 2}{51 \pm 2}$ | $\frac{95 \pm 2}{77 \pm 2}$ |
| В'язкість руйнування, МПа·м ^{1/2} | $\frac{11 \pm 0,5}{10 \pm 0,5}$ | $\frac{14 \pm 0,5}{12 \pm 0,5}$ | $\frac{17 \pm 0,5}{14 \pm 0,5}$ |

Аналіз даних, що представлені в таблиці 1.4, показує, що сплави з комерційного продукту мають менші механофізичні властивості, ніж експериментальні. Причому, якщо різниця у властивостях сплавів, отриманих за змішаним режиму спікання, не перевищує 5 %, то у сплавів, отриманих спіканням в вакуумі і ізостатичним гарячим пресуванням, різниця у властивостях становить від 15 % до 20 %. Порівняльні випробування ріжучих пластин з твердого сплаву ВК8 показали, що стійкість при різанні у експериментальних пластин, виготовлених методом ізостатичного гарячого пресування, в залежності від

швидкості різання від 5 до 19 разів вище, ніж у промислових різців.

1.7 Особливості спікання твердих сплавів

У сучасному виробництві у переважній більшості твердих сплавів використовують кобальт в якості сполучного матеріалу, оскільки його розплав ідеально змочує зерна WC [19]. За останнє сторіччя було проведено ряд досліджень, що стосуються системи W-C-Co. В 1931 році авторами роботи [20] вперше було визначено основні фазові області діаграми W-C-Co. Пізніше, в 1952 році Раутала і Нортон [21] відкрили в системі W-C-Co дві додаткові карбідні фази, названі θ і κ , що мають склади $\text{Co}_3\text{W}_6\text{C}_2$ і $\text{Co}_3\text{W}_{10}\text{C}_4$ відповідно. На малюнку 1.4 представлено розташування фазових полів, лінії подвійних евтектики і точка потрійний евтектики WC+ γ +C при температурі затвердіння сплавів за узагальненими даними досліджень системи W-C-Co [22]-[24].

Однофазна область твердого розчину γ вказує на суттєву розчинність вольфраму і вуглецю в кобальті [26]. Розчинність WC в Co при температурі спікання становить 35 % - 37 % і зменшується в міру зниження температури, так що при температурі затвердіння евтектики (приблизно 1300 °C) розчинність становить 10 %.

Вище лінії Co-WC розташовується трифазна область γ +WC+C, а вздовж лінії CoC вузька двофазна область γ + C. Нижче лінії 3-WC розташування фазових полів діаграми визначається існуванням трьох потрійних сполук $\text{Co}_x\text{W}_y\text{C}_z$, що позначаються як η_1 , η_2 , η_3 . Тверда і тендітна фаза η_1 має широку область гомогенності і відповідає формулі: $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$, перебуваючи в рівновазі з фазами WC і γ . Фаза η_1 , зустрічається в твердих сплавах при нестачі в них вуглецю. Фази η_2 і η_3 мають менший вміст вуглецю і мають меншу область гомогенності, ніж фаза η_1 [23]-[24].

Діаграму стану W-C-Co з фазовими полями при температурі затвердіння представлена на рисунку 1.6.

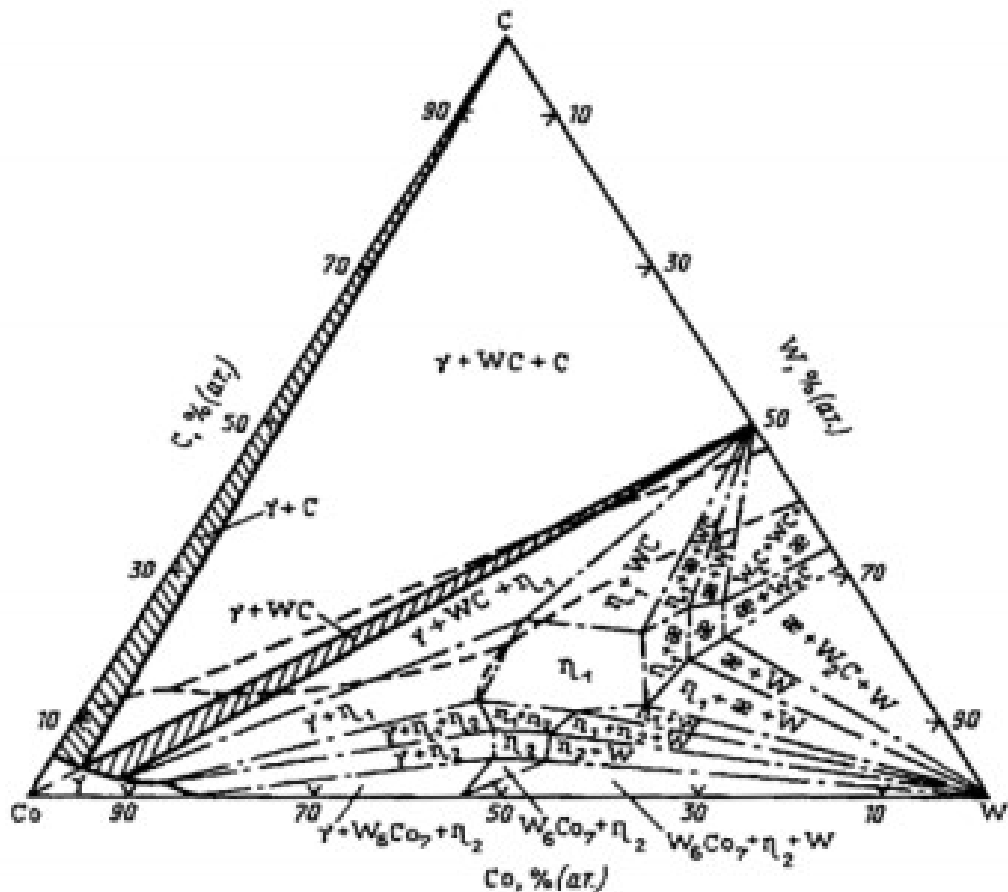


Рисунок 1.6 – Діаграму стану W-C-Co з фазовими полями при температурі затвердіння [23]

Ширина двофазної області $\gamma + WC$ дозволяє встановити допустимі коливання в змісті вуглецю в сплавах WC-Co без небезпеки появи в них інших фаз: графіту в разі надлишку вуглецю або фази η_1 в разі його нестачі.

Поблизу лінії 3-С області Co-WC-C-Co розташована потрібна евтектика $\gamma + WC + C$, що утворюється при стабільній кристалізації, температура плавлення якої 1300 °C, склад евтектики близько 37 % WC-Co.

На даний момент в сучасному виробництві спіканням в присутності рідкої фази виготовляється близько 90% спечених твердих сплавів [26].

Під час спікання твердих сплавів марок ВК, які отримують з використанням стандартної технології порошкової металургії, відбуваються процеси, що описані нижче [7]:

- усадка пористого тіла починається з процесу спікання в твердій фазі

при 1050 °C - 1150 °C і супроводжується утворенням кобальтового твердого розчину;

- при досягненні температури появи евтектики (плавлення кобальтової фази) починають діяти сили поверхневого натягу, які викликають перегрупування зерен фази карбіду в сторону більш щільною упаковки і, як результат, швидке ущільнення;

- у міру подальшого підвищення температури або витримки при спіканні сплавів відбувається зміна форми і зростання WC-фази, формується структура, розвиваються контакти між зернами, взаємне розташування зерен наближається до характерного для системи з "двогранним кутом", і утворюється карбідний скелет, пронизаний кобальтовим розплавом;

- при охолодженні відбувається випадання на наявних надлишкових зернах WC розчиненого в рідкій фазі карбіду вольфраму, що призводить до певного зростання розміру зерна фази WC, а також для заповнення проміжків між зернами і створення додаткових карбідних контактів (особливо при малому вмісті кобальту);

- формується остаточна структура сплаву, що складається з фази WC і фази на основі кобальту

- твердий розчин WC в кобальті (α -Co та/або β -Co);

- при типових швидкостях охолодження в промислових печах (> 3 град / хв), можлива, згідно діаграмі W-C-3, внутрікристалічної ізоляція в γ -фазі встигає вирівнюватися при охолодженні, завдяки чому при спіканні твердих сплавів WC-Co виключена можливість протікання метастабільною кристалізації з одночасним утворенням η -фази і графіту [7].

1.8 Аналіз існуючих математичних моделей на стиск твердих сплавів

1.8.1 Модель Гурсо

Існують різні математичні моделі на стиск твердих сплавів. Так, у моделі Гурсо передбачається, що руйнування конструкції при інтенсивних навантаженнях

відбувається за рахунок зародження і зростання мікропорожнеч в обсязі матеріалу. В якості основної характеристики введена функція f , що задає концентрацію пустот в локальному обсязі в кожен момент часу, представлена у вигляді [27]:

$$f = f_{gr} + f_{nucl},$$

де f_{gr} – доля існуючих;

f_{nucl} – доля пустот, що зароджуються.

При цьому зростання існуючих мікропорожнеч визначається залежністю:

$$f'_{gr} = (1 - f)\varepsilon'_{kk},$$

де $\varepsilon_{kk} = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}$ – відносна зміна об'єму.

З точки зору ймовірнісного підходу розглядається поява нових пустот і задається за допомогою нормального розподілу

$$f_{nucl} = A\varepsilon'_p,$$

$$A = \frac{f_N}{s_N \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\varepsilon_p - \varepsilon_N}{s_N}\right)^2\right),$$

де ε_N – величина деформації, що відповідає найбільшій інтенсивності зародження мікропорожнеч;

s_N – параметр, котрий має сутність дисперсії розподілу, характеризує діапазон деформацій, на який припадає основний обсяг утворення пустот.

Локальне руйнування матеріалу настає при досягненні критичного значення пористості, $f = f_c$. Як додатковий критерій руйнування на заданому інтервалі значень параметра виду напруженого стану використовується критерій Джонсона-Кука, в якому деформація при руйнуванні задається співвідношенням

$$l_2 \leq \frac{\sigma_H}{\sigma_m} \leq l_1,$$

де $\frac{\sigma_H}{\sigma_m}$ – параметр типу навантаженого стану

l_1, l_2 – матеріальні константи

$$\varepsilon^f = (D_1 + D_2 \exp(D_3 \frac{\sigma_H}{\sigma_m}))(1 + D_4 \ln \varepsilon'),$$

де D_i – постійна матеріалу.

Руйнування відбувається при:

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon_3}{\varepsilon^f} = 1.$$

Зв'язок між напруженнями і деформаціями визначається по асоціативному закону з функцією плинності такого вигляду:

$$\Phi = \frac{\sigma_m^2}{\sigma_y^2} + 2q_1 f^* ch(\frac{3q_2 \sigma_H}{2\sigma_m}) - 1 - (q_1 f^*)^2 = 0,$$

де $\sigma_m = \sigma_m(\varepsilon_m^q)$ – інтенсивність напружень по Мізесу;

σ_y – межа плинності,

σ_H – середній гідростатичний тиск,

f^* визначається з системи рівнянь:

$$f^*(f) = f, f \leq f_c,$$

$$f^*(f) = f_c + \frac{1/q_1 - f_c}{f_F - f_c}(f - f_c), f > f_c,$$

де f_F – об'єм пустот, при котрому настає руйнування;

q_1, q_2 - коефіцієнти, котрі були введені Твергаардом для кращого опису поведінки матеріала.

Зауважимо, що функція плинності Φ залежить від виду напруженого стану і в разі $f^* = 0$, вона збігається зі звичайним умовою текучості Мізеса.

1.8.2 Математична модель динамічної міцності при ударному навантаженні

Питомий об'єм пористого середовища v представляється у вигляді суми питомого об'єму матриці v_m і питомого об'єму пір v_p . Пористість матеріалу характеризується відносним об'ємом пустот $\xi = v/v_p$, або параметром $\alpha = v/v_m$, які пов'язані залежністю $\alpha = 1/(1-\xi)$. Система рівнянь, що описують рух пористого пружнопластичного середовища, має вигляд [28]:

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho dV = 0, \quad \frac{d}{dt} \int_V \rho u dV = \frac{d}{dt} \int_S n \cdot \sigma dS, \quad \frac{d}{dt} \int_V \rho E dV = \frac{d}{dt} \int_S n \cdot \sigma \cdot u dS, \quad e = \frac{s^j}{2\mu} + \lambda s, s : s = \frac{2}{3} \sigma_T^2,$$

де t – час;

V – об'єм інтегрування;

S – його поверхня;

n – одиничний вектор зовнішньої нормалі;

ρ – густина;

$\sigma = -\rho g + s$ – тензор напружень;

s – його девіатор;

p – тиск;

g – метричний тензор;

u – вектор швидкості;

$E = \varepsilon + u \cdot u / 2$ – повна питома енергія;

ε – питома внутрішня енергія;

$e = d - (d : g)g / 3$ – девіатор тензора швидкостей деформації;

$d = (\nabla u + \nabla u^T) / 2$ – тензор швидкостей деформацій;

$s^j = s' + s \cdot \omega$ – похідна девіатора тензора напружень в розумінні Яуманна – Нолла;

$\omega = (\nabla u^T - \nabla u) / 2$ – тензор вихору;

$\mu = \mu_{m0}(1 - \xi) \left[1 - (6\rho_{m0}c_{m0}^2 + 12\mu_{m0})\xi / (9\rho_{m0}c_{m0}^2 + 8\mu_{m0}) \right]$ – ефективний модуль зсуву;

$\sigma_T = \sigma_s / \alpha$ – межа плинності відповідно;

$\rho_{m0}, c_{m0}, \mu_{m0}$ – початкові щільність, об'ємна швидкість звуку і модуль зсуву матеріалу матриці відповідно.

Параметр λ виключається за допомогою умови пластичності Мізеса. У загальному випадку динамічний межа плинності матеріалу матриці σ_s є функцією швидкості деформації, тиску, температури, а також деяких інших параметрів.

Якщо відома лінійна залежність швидкості ударної хвилі D від масової швидкості u для матричного матеріалу $D = c_{m0} + S_{m0}u$, то рівняння стану пористого матеріалу має вигляд:

$$p = \frac{\rho_{m0}}{\alpha} \left[\gamma_{m0}\varepsilon + \frac{c_{m0}^2(1 - \frac{\gamma_{m0}\eta}{2})\eta}{(1 - S_{m0}\eta)^2} \right],$$

де γ_{m0} – коефіцієнт Грюнайзена матричного матеріалу;

$$\eta = 1 - \rho_{m0} \frac{v}{\alpha}.$$

Зростання пор в пластично деформованому матеріалі при розтягуванні описується рівнянням:

$$\frac{\rho_{m0}c_{m0}^2(1 - \frac{\gamma_{m0}\varepsilon}{2})\eta}{(1 - S_{m0}\eta)^2} + \rho_{m0}\gamma_{m0}\varepsilon + \alpha_s \ln\left(\frac{\alpha}{\alpha - 1}\right) < 0,$$

$$1 < \alpha_{00} < \alpha < \alpha_{кр}.$$

Використовується при $\alpha\rho + \alpha_s \ln\left(\frac{\alpha}{\alpha - 1}\right) < 0$, інакше:

$$\frac{d\alpha}{dt} = 0.$$

Рівняння містить параметри $\alpha_{00}, \alpha_{кр}, \alpha_s$. Зауважимо, що під час виконання розрахунків параметр $\alpha_s = \frac{2}{3} \sigma_s$ беруть в якості параметра, що не залежить від σ_s . Тобто по суті він підбирається на основі кращого узгодження розрахункових і експериментальних даних.

Параметр α_{00} - залишкова пористість в матеріалі, яка не може бути усунена попередніми стисненням. Цей параметр служить для визначення початкового порогового тиску.

Параметр $\alpha_{кр}$ це величина пористості, за якої відбувається руйнування матеріалу.

Гранична величина відносного обсягу пустот є локальним критерієм відривного руйнування:

$$\xi^* = \frac{\alpha_{кр} - 1}{\alpha_{кр}}.$$

Всі ці параметри можуть бути уточнені чи визначені під час порівняння даних розрахунку з результатами експерименту по сколюваному руйнуванні пластин в разі одноосового деформованого стану [29].

В якості зсувного критерію руйнування розглядається величина граничної інтенсивності пластичної деформації

$$e_u^* = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{3T_2 - T_1^2},$$

де T_1, T_2 – перший та другий інваріанти тензора пластичних деформацій.

Вхідні параметри для моделі математичної міцності при ударному навантаженні представлена в таблиці 1.5.

Таблиця 1.5 – Вхідні параметри для моделі авторів [28]

| Параметр | АД-85 | TiB_2 | B_4C | Дрібнозернистий бетон |
|-----------------------------------|---------|---------|---------|-----------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| $\rho_0, \text{г/см}^3$ | 3,66 | 4,51 | 2,52 | 2,2 |
| $c_0, \text{см/мкс}$ | 0,66 | 0,90 | 0,93 | 0,233 |
| q | 0,88 | 0,75 | 1,44 | 1,51 |
| γ_0 | 1,94 | 1,50 | 1,5 | 1,5 |
| $\mu_0, \text{ГПа}$ | 92 | 210 | 182 | 17 |
| ν | 0,233 | 0,28 | 0,17 | 0,256 |
| R_0 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 |
| R^* | 11,6 | 11,6 | 11,6 | 11,6 |
| $N_0 * 10^{-7}, \text{см}^{-3}$ | 64,0 | 64,0 | 64,0 | 64,0 |
| $\eta_1, \text{ГПа} * \text{мкс}$ | 0,705 | 0,705 | 0,700 | 7000 |
| $\eta_2, \text{ГПа} * \text{мкс}$ | 0,1 | 0,5 | 0,5 | 800 |
| $p_0, \text{ГПа}$ | 0,38 | 0,5 | 1,8 | 0,00924 |
| $S_{01}, \text{ГПа}$ | 2,6 | 5,0 | 6,0 | 0,0924 |
| β | 1 | 1 | 1 | 1 |
| $Y_0, \text{ГПа}$ | 0,15838 | 0,16000 | 0,16000 | - |
| α_0 | 1,0706 | 1,0006 | 1,0006 | 1,0100 |
| k | 0,75 | 0,75 | 0,75 | 0,82 |
| $\sigma_{min}, \text{ГПа}$ | - | - | - | 0,0077 |
| $\sigma_{max}, \text{ГПа}$ | - | - | - | 0,216 |
| $a_s, \text{ГПа}$ | - | - | - | 0,042 |
| ξ^* | - | - | - | 0,013 |
| e_u^* | - | - | - | 0,150 |

Крихкі матеріали містять в собі велику кількість концентраторів напруг, таких як: границі зерен, пори, тріщини. Мікроруйнування при стисненні можливе при девіаторних напружень, що спричинює падіння супротиву деформації [28].

Неоднорідне пористе середовище слід вважати двухкомпонентним, котрий складається з твердої фази та з різного роду включень (пори, тріщини).

1.8.3 Математична модель межі пружності твердого сплаву *WC-Co* при стискуванні

При одноосьовому стисканні твердосплавного зразка виникають середні за обсягами фаз напруги, які визначаються за допомогою наступних співвідношень [29]:

$$\begin{aligned}\langle \sigma_{11}^1 \rangle &= -\sigma \left(\frac{2\mu_1(\mu_2 - \mu)}{3\mu(\mu_2 - \mu_1)v_1} + \frac{K_1(K - K_2)}{3K(K_1 - K_2)v_1} \right) - \frac{3K_1K_2t(a - \langle a \rangle)}{(K_1 - K_2)v_1}; \\ \langle \sigma_{22}^1 \rangle &= \langle \sigma_{33}^1 \rangle = \sigma \left(\frac{\mu_1(\mu_2 - \mu)}{3\mu(\mu_2 - \mu_1)v_1} + \frac{K_1(K - K_2)}{3K(K_1 - K_2)v_1} \right) - \frac{3K_1K_2t(a - \langle a \rangle)}{(K_1 - K_2)v_1}; \\ \langle \sigma_{11}^2 \rangle &= -\sigma \left(\frac{2\mu_1(\mu - \mu_1)}{3\mu(\mu_2 - \mu_1)v_2} + \frac{K_2(K_1 - K)}{3K(K_1 - K_2)v_2} \right) - \frac{3K_1K_2t(a - \langle a \rangle)}{(K_1 - K_2)v_2}; \\ \langle \sigma_{22}^2 \rangle &= \langle \sigma_{33}^2 \rangle = \sigma \left(\frac{\mu_2(\mu - \mu_1)}{3\mu(\mu_2 - \mu_1)v_2} + \frac{K_2(K_1 - K)}{3K(K_1 - K_2)v_2} \right) - \frac{3K_1K_2t(a - \langle a \rangle)}{(K_1 - K_2)v_2},\end{aligned}$$

де σ – стискаюче навантаження;

μ, K, a - модуль зсуву, модуль об'ємного стиснення і коефіцієнт теплового розширення сплаву відповідно;

$t = T_{\text{комн}} - T_{\text{рел}}$ - перепад температур між кімнатної і температурою, при якій припиняється релаксація напружень під час охолодження сплаву після спікання;

$\langle a \rangle = v_1 a_1 + v_2 a_2$, де v_k, a_k - об'ємні змісту і коефіцієнти теплового розширення k -ї фази;

індекси 1 і 2 (верхні у напружень, нижні у модулів пружності) відповідають

кобальтовою зв'язці і карбідним зернам.

Для формулювання критерію досягнення твердим сплавом межі пружності виходитимемо з того, що зовнішня стискає навантаження P сприймається лише карбідним скелетом.

Це припущення виправдане для малокобальтових твердих сплавів, в яких тільки частина карбідних зерен утворює такий скелет.

Після проведення певного ряду математичних операцій, спрощень та заміन шукана формула для умовної межі пружності має наступний вигляд:

$$\sigma_y^c = 3(\sigma_{0,05}^2 C + \frac{3K_1 K_2 t(a - \langle a \rangle)}{(K_1 - K_2)}) (\frac{2\mu_2(\mu^* - \mu_1^*)}{\mu^*(\mu_2 - \mu_1^*)} + \frac{K_2(K_1 - K)}{K(K_1 - K_2)})^{-1},$$

де $\sigma_{0,05}^2$ - умовна межа пружності полікристалічного карбіду вольфраму при залишковій деформації 0,05 %.

Остання формула містить пружні модулі і коефіцієнти теплового розширення твердого сплаву K, μ^*, a і кожної його із двох фаз K_1, μ_1^*, a_1 та K_2, μ_2^*, a_2 .

1.8.4 Одновимірна модель стискування

Одним із найпопулярніших і найбільш простим для аналізу є одновимірна математична модель стискування. Дана модель дає базові уявлення щодо власне ударно-хвильового середовища, проте точними результатами можуть слугувати лише результати по абсолютній міцності. Інші данні можуть бути розраховані, як оціночні.

Фундаментальні закони збереження маси, кількості руху і енергії речовини в ударній хвилі виражаються системою алгебраїчних рівнянь Ренкіна-Гюгоніо. В разі рівності нулю тиску і швидкості речовини перед фронтом хвилі рівняння неперервності, збереження кількості руху та рівняння збереження енергії

відповідно мають наступний вигляд [29]:

$$V = V_0 \frac{U_s - u_p}{U_s}; \quad p = \rho_0 U_s u_p; \quad E - E_0 = -\frac{p(V - V_0)}{2}$$

де V – питомий об'єм;

u_p – масова швидкість;

p – тиск;

E – питома внутрішня енергія;

U_s – швидкість розповсюдження ударної хвилі відносно не збудженого середовища питомого об'єму V .

V_0, p_0, E_0 – початкові значення відповідних величин.

Ілюстрація к рівнянню збереження ударної хвилі представлена на рисунку 1.7

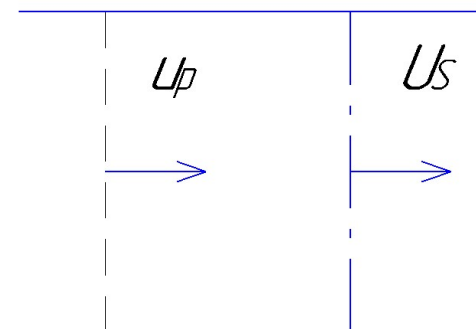


Рисунок 1.7 – Ілюстрація к рівнянню збереження ударної хвилі

Якщо в ударній хвилі нема виділення чи поглинання енергії, то:

$$p u_p = \rho_0 U_s \left(\frac{1}{2} u_p^2 + E - E_0 \right).$$

Ударні хвилі поширюються з надзвуковою швидкістю відносно речовини перед хвилею, проте швидкість ударної хвилі щодо ударно-стисненої речовини є дозвуковою, тобто обурення в ударно-стисненій речовині наганяють фронт ударної хвилі. Лінія, що з'єднує початковий стан перед фронтом ударної хвилі і стан p, V за

ударною хвилею називається лінією Релея або прямою Міхельсона. Її рівняння має вигляд:

$$p = \rho_0^2 U_s^2 (V_0 - V).$$

В області помірних тисків ударного стиснення конденсованих середовищ добре працює квазіакустичне наближення, згідно з яким швидкість ударної хвилі є середнє арифметичне з швидкості звукових збурень перед і за нею:

$$U_s = [c_0 + a(p)] / 2 = [c_0 + c(p) + u_p] / 2.$$

Так як в цій моделі розглядається лише один простір, доцільно використовувати саме субстанційні координати Лагранжа, що зв'язані з речовиною.

В якості координати Лагранжа h слід використати просторову координату x частинки в початковий момент часу:

$$h = (\int_0^x \rho dx) / \rho_0, \quad \frac{\partial h}{\partial x} \Big|_t = \frac{\rho}{\rho_0},$$

де ρ_0 – значення густини в початковий момент часу;

ρ – значення густини в момент часу t .

Тоді враховуючи часткові похідні за часом t та за координатою h похідні від функції f вздовж певних траєкторій на площині h - t мають наступний вигляд:

$$\frac{df}{dt} = \frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial f}{\partial h} \cdot \frac{\partial h}{\partial t},$$

$$\frac{df}{dh} = \frac{\partial f}{\partial h} + \frac{\partial f}{\partial t} / \frac{\partial h}{\partial t}.$$

Нехтуючи дівіаторними компонентами напружень, теплопровідністю,

виділенням або поглинанням енергії і релаксаційним явищами одномірний рух суцільного середовища, що стискується, описується системою рівнянь часткових похідних, що виражають фундаментальні закони збереження маси, кількості руху і енергії, доповненої рівнянням стану речовини:

$$\rho_0 \frac{\partial V}{\partial t} - \frac{\partial u_p}{\partial h} = 0 \quad \rho_0 \frac{\partial u_p}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial h} = 0 \quad \frac{\partial E}{\partial t} = -p \frac{\partial V}{\partial t} \quad E = E(p, V).$$

Ілюстрація к рівнянню неперервності та збереженню кількості руху представлена на рисунку 1.8.

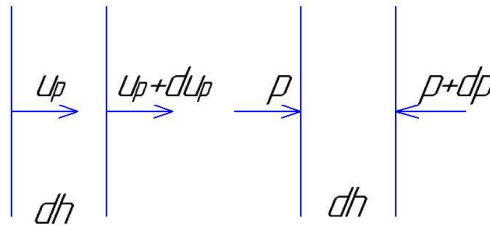


Рисунок 1.8 – Ілюстрація к рівнянню неперервності та збереженню кількості руху

Для прикладу, необхідно розглядати шар речовини товщиною dh з одиничною площею перетину, ліва межа якого рухається разом з речовиною зі швидкістю u_p , а права - зі швидкістю $u_p + du_p$. У момент часу t об'єм цього шару дорівнює dh . Протягом проміжку часу dt ліва межа шару зміщується на відстань $u_p dt$, а права - на відстань $(u_p + du_p)dt$, внаслідок чого об'єм шару стає рівним $dh + du_p dt$. При цьому з рисунку видно, що в разі позитивного градієнта швидкості ($du/dh > 0$) товщина шару з часом збільшується, при негативному градієнті відбувається стиснення виділеного шару. Відносна зміна об'єму шару dV/V_0 пропорційна зміні товщини виділеного шару, рівному $du_p dt$. Відповідно, швидкість зміни об'єму дорівнює:

$$\frac{\partial(V/V_0)}{\partial t} = \frac{\partial u_p}{\partial h}.$$

Через наявність різниці тисків відповідно до закону Ньютона маємо:

$$\rho_0 dh \frac{\partial u_p}{\partial t} = -dp.$$

Тоді відповідно до другого закону термодинаміки, рівняння збереження енергії являє собою умову адіабатичного процесу і приймає наступний вигляд:

$$dE = TdS - pdV,$$

де S – питома ентропія при відсутності зовнішніх джерел тепла.

При наявності тепловиділення або тепловтрат зміна питомої внутрішньої енергії E виділеної лагранжевої частки відбувається як за рахунок роботи стиснення, яку виробляє над нею довкілля, так і внаслідок виділення (або поглинання) енергії Q від сторонніх джерел:

$$\frac{dE}{dt} = -p \frac{dV}{dT} + \frac{dQ}{dt}.$$

Ізоентропічні процеси супроводжуються зміною температури речовини.

Ізоентропічне стиснення речовини призводить до його нагрівання; при зниженні тиску в речовині його температура падає. Внаслідок теплового розширення питомих об'єм адіабатичного стисненого речовини виявляється більшим, ніж речовини, стисненого при постійній температурі.

1.9 Висновки та постановка завдання дослідження

Після опрацювання та аналізу теоретичної частини магістерського дослідження стає очевидно, що проблема дослідження властивостей ударно-хвильового середовища наразі продовжує бути актуальною. Це підтверджується як

і сферою застосування, де основним напрямком залишається виготовлення ріжучого інструменту, так і сучасними дослідженнями та спробами розробити абсолютну математичну модель поведінки матеріалів в ударно-хвильових умовах, як приклад – броне плита.

Хоча технічні дослідження вже досить давно ведуться і більшість інформації відома, оптимізація режимів спікання та методів регулювання твердості і структури досі є актуальною темою. В сучасному виробництві використовують різні методи, такі як: легування карбідом танталу, використання порошку синтезованого за механохімічною технологією, використання порошку з наночастинками монокарбіду вольфраму. Ведеться розробка нових експериментальних режимів, що в свою чергу призводять до нових досліджень.

Основними напрямком дослідження можна вважати наступне – побудова моделі оптимізації режимів спікання, що не залежить від обладнання та вихідного матеріалу, котрі використовуються на підприємстві. Та побудова моделі розповсюдження тріщини, щоб можна було робити поправки ще на стадії планування.

2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Методика проведення експерименту

Процес виготовлення зразків можна подати наступною технологічною схемою, котра представлена на рисунку 2.1.



Рисунок 2.1 – технологічна схема одержання зразків

2.2 Вихідний матеріал

Роботу було розпочато з наданим готовим продуктом ВК8. Вихідний розмір частинок близько 1 *мкм*. Хімічний склад ВК8 згідно СТО 00196144-0727-2012 наведений нижче в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Хімічний склад ВК8 за СТО 00196144-0727-2012

| Марка | Вміст компонентів, % | | | | |
|-------|----------------------|-----------------------------------|---------|--------|--------|
| | Вольфрам | Вуглець загальний / вільний | Кобальт | Залізо | Кисень |
| ВК8 | основа | 5,51 / 0,04 | 7,61 | 0,016 | 0,22 |

2.3 Підготовка зразків до спікання

Спершу, було виконано додаткове подрібнення з метою збільшення дисперсності порошкового твердого сплаву на кульовому барабанному млині з використанням контейнера з нержавіючої сталі, котрий був футерований твердим сплавом ВК3. Кульки для, розмелу із твердого сплаву ВК6. Відношення об'єму кульок до суміші 1/3.

В якості рідкої фази використовувався етиловий спирт у співвідношенні 200 г спирту на 1 кг порошку. Тривалість розмелу склала 100 годин.

Після розмелу твердий сплав було висушено в сушильній шафі. Конгломерати твердого сплаву було протерто крізь металічні сита до замішування з пластифікатором.

В якості пластифікатора було обрано синтетичний каучук. Технічні характеристики синтетичного каучуку за ГОСТ 13835-73 [30].

Змішування здійснювалося у розчині технічно чистого бензину з гумовим клеєм на основі синтетичного каучуку (5 г клею на 100 мл бензину). Після випарювання бензину суміш було просушено та протерто крізь металічні сита.

Пресування проводилось на гідравлічних пресах.

Робочий тиск склав 0,5 тони/см². Звідки загальне зусилля розраховується за формулою [31]:

$$F = P_{роб} \cdot F,$$

де $P_{роб}$ - прикладений тиск;

F - площа пресування;

Розміри зразка були обрані виходячи з необхідних параметрів зразків для наступного їх випробування на стиснення (співвідношення діаметру до висоти $h = 1,5 d$).

Для виготовлення зразків використовувалась сталевая прес-форма, для виготовлення циліндричних тіл. Для зменшення бічного тертя та легшого виймання заготовки, робочі поверхні прес-форми було змащено жировими добавками.

Після проведених операцій зі зразками, складаємо в окремо виділену ємність, для подальшого зберігання, та уникнення контакту з зовнішнім середовищем.

2.4 Процес спікання зразків

Спікання зразків ВК8, проводили у вакуумній печі СШВЛ 1,25/10-ІІ при режимах, записаних у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Режими проведення експерименту

| № | Т° С попереднього спікання | t, хв попереднього спікання | Т° С спікання | t, хв спікання |
|---|----------------------------------|-----------------------------------|------------------|-------------------|
| 1 | 1000 | 30 | 1380 | 30 |
| 2 | 1000 | 30 | 1380 | 15 |
| 3 | 1000 | 30 | 1380 | 2 |
| 4 | 1000 | 15 | 1380 | 30 |
| 5 | 1000 | 15 | 1380 | 15 |
| 6 | 1000 | 15 | 1380 | 2 |
| 7 | - | - | 1380 | 30 |
| 8 | - | - | 1380 | 15 |
| 9 | - | - | 1380 | 2 |

На далі, буде використовувати наступний шифр при описанні режимів спікання N/M , де N – час спікання, а M – час витримки.

2.5 Визначення густини

Кожен зразок для відповідного режиму, зашифруємо в форматі $a.b$, де a – відповідає номеру режиму, а b – номер зразка (виміри проводилося паралельно для двох заготовок). Запис відповідної інформації із зашифрованою представлено у таблиці 2.3, що знаходиться далі:

Таблиця 2.3 - Значення ваги, густини та геометричних показників зразків

| № | Вихідна вага, г | Довжина, мм | Діаметр, мм | Вага після спікання, г | Вага гідростат., г | Густина, г/м ³ |
|-----|-----------------|-------------|-------------|------------------------|--------------------|---------------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 1.1 | 4,45 | 13,0 | 7,9 | 4,3990 | 4,1012 | 14,7720 |
| 1.2 | 4,47 | 13,1 | 7,9 | 4,3890 | 4,0987 | 14,6644 |
| 2.1 | 4,52 | 13,2 | 7,9 | 4,3698 | 4,0666 | 14,4123 |
| 2.2 | 4,54 | 13,3 | 7,9 | 4,3897 | 4,0892 | 14,6080 |
| 3.1 | 4,49 | 13,3 | 7,9 | 4,3367 | 4,0283 | 14,0619 |
| 3.2 | 4,50 | 13,3 | 7,9 | 4,3768 | 4,0800 | 14,7466 |
| 4.1 | 4,44 | 13,0 | 7,9 | 4,3982 | 4,0965 | 14,5781 |
| 4.2 | 4,46 | 13,2 | 7,9 | 4,4000 | 4,0939 | 14,3744 |
| 5.1 | 4,47 | 13,0 | 7,9 | 4,3939 | 4,0938 | 14,6415 |
| 5.2 | 4,45 | 13,0 | 7,9 | 4,3960 | 4,0900 | 14,3660 |
| 6.1 | 4,45 | 13,0 | 7,9 | 4,3888 | 4,0854 | 14,4655 |
| 6.2 | 4,45 | 13,1 | 7,9 | 4,3981 | 4,0981 | 14,7093 |
| 7.1 | 4,48 | 13,2 | 7,9 | 4,3866 | 4,0898 | 14,7796 |
| 7.2 | 4,46 | 13,1 | 7,9 | 4,3766 | 4,0798 | 14,7460 |
| 8.1 | 4,45 | 13,0 | 7,9 | 4,3856 | 4,0819 | 14,4406 |
| 8.2 | 4,47 | 13,0 | 7,9 | 4,4856 | 4,1767 | 14,5212 |
| 9.1 | 4,49 | 13,2 | 7,9 | 4,3377 | 4,0355 | 14,3537 |
| 9.2 | 4,45 | 13,0 | 7,9 | 4,3916 | 4,0910 | 14,5658 |

Розрахунок густини проводиться з використанням гідростатичного зважування, тобто спочатку розраховується об'єм через різницю мас та відому густину рідини чи газу, а потім вже власно густина за формулами:

$$V = \frac{m_1 - m_2}{\rho_2},$$

$$\rho_1 = \frac{m_1}{V},$$

де m_1 – маса при першому зважуванні;

m_2 – маса при другому зважуванні у водяному середовищі;

V – об'єм тіла.

2.6 Дослідження твердості

Твердість – відповідно до ДСТУ 2825-94 [32], здатність матеріалу чинити опір деформуванню та руйнуванню під дією місцевих контактних зусиль.

Вимірювання твердості проводилося за методом Роквелла. Твердість визначається за глибиною відбитка алмазного конуса у поверхні матеріалу, що тестується. Твердість є безрозмірною і позначається HR, HRB, HRC і HRA в залежності від матеріалу [33].

Прилад для вимірювання твердості одразу дає готове значення твердості. Проте в разі необхідності вона обчислюється за такою формулою

$$HR = 100 - kd,$$

де d – глибина втиснення наконечника після зняття основного навантаження;

k – коефіцієнт.

В залежності від матеріалів поділяють наступні шкали твердості, котрі представлені в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Шкали за методом Роквелла [34]

| Назва | Шкали | Сила, кгс | Індентор | Використання |
|-------|-------|-----------|------------------------|--|
| A | HRA | 60 | 120° алмазний конус | Інструментальні криці |
| B | HRB | 100 | 1,58 мм сталева кулька | АІ стопи, м'які криці |
| C | HRC | 150 | 120° алмазний конус | Загартовані криці |
| D | HRD | 100 | 120° алмазний конус | Загартовані криці |
| E | HRE | 100 | 3,16 мм сталева кулька | Антифрикційні стопи |
| F | HRF | 60 | 1,58 мм сталева кулька | Стопи кольорових мет. |
| G | HRG | 150 | 1,58 мм сталева кулька | Фосфористі бронзи |
| H | HRN | 60 | 1,58 мм сталева кулька | М'які метали низької однорідності, ливарні стопи |
| K | HRT | 150 | 1,58 мм сталева кулька | |

Так як досліджуваний матеріал – ВК8, то шкала вимірювання HRA.

Результатом вимірювання слугує наступна таблиця 2.5, котра демонструє вимірюну твердість зразків.

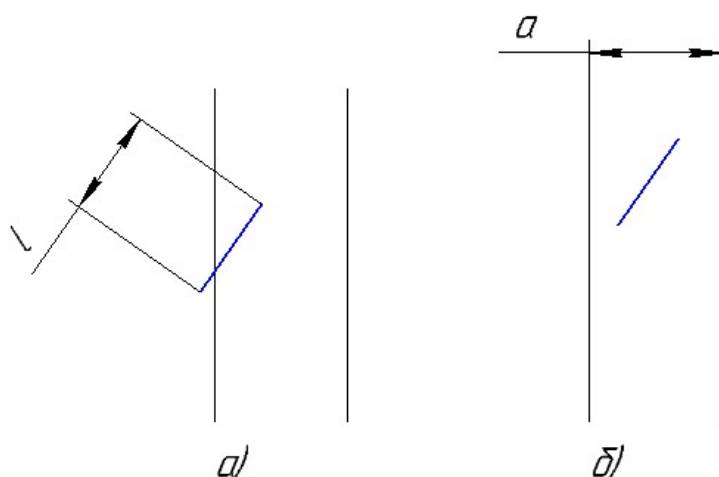
Таблиця 2.5 – Твердість зразків

| Режим | 30\30 | 15\30 | 2\30 | 30\15 | 15\15 | 2\15 | 30\0 | 15\0 | 2\0 |
|-------|-------|-------|------|-------|-------|------|------|------|------|
| HRA | 90,3 | 88,9 | 88,1 | 88,8 | 88,5 | 88,0 | 88,7 | 88,1 | 87,9 |

2.7 Дослідження мікроструктури

Рішення задачі про вимір розмірів зерен була поставлена і вирішена вже давно. Як одна із альтернатив, основою може слугувати метод випадкових січних, котрий базується на задачі Бюффона [35]. Данна задача була запропонована та вирішена французьким вченим Жоржом-Луї Леклерк де Бюфофом ще у 1777 році [36]. Дана задача направлена на статистичне обчислення «числа Пі». Постановка задачі наступна: є площа, котра розграфлена прямими паралельними лініями. Ці лінії розташовані на відстані $2a$ одна від одної. Голка, довжина котрої

$2l$, при чому $2l < 2a$, кидається навмання. Необхідно знайти ймовірність того, що голка перетне пряму. Схожий алгоритм і в нашому випадку. Обирається випадкова базова пряма та на випадковій відстані від неї креслиться задана кількість паралельних прямих. Саме завдяки випадковості й досягається достатньо висока точність розрахунку розмірів зерен. Ілюстрація до задачі Бюффона представлена рисунку 2.2:



а – Голка перетинає пряму; б – голка не перетинає пряму

Рисунок 2.2 – Ілюстрація до задачі Бюффона

Для аналізу необхідно спершу зробити шліфи, після чого вже можна робити знімки поверхні. Зображення поверхні були виконані на РЭМ-106И. Розглянемо роботу з зображення на прикладі 1 режиму – 30/30.

Зображення при збільшенні в 100 раз показує наявність пор. Їх кількість дуже мала і приблизно дорівнює 0,3 %, що свідчить про високу якість зразків.

На рисунку 2.3, вже збільшення складає 5000 раз, де вже можна побачити саму структуру та визначити кількість ета фази.

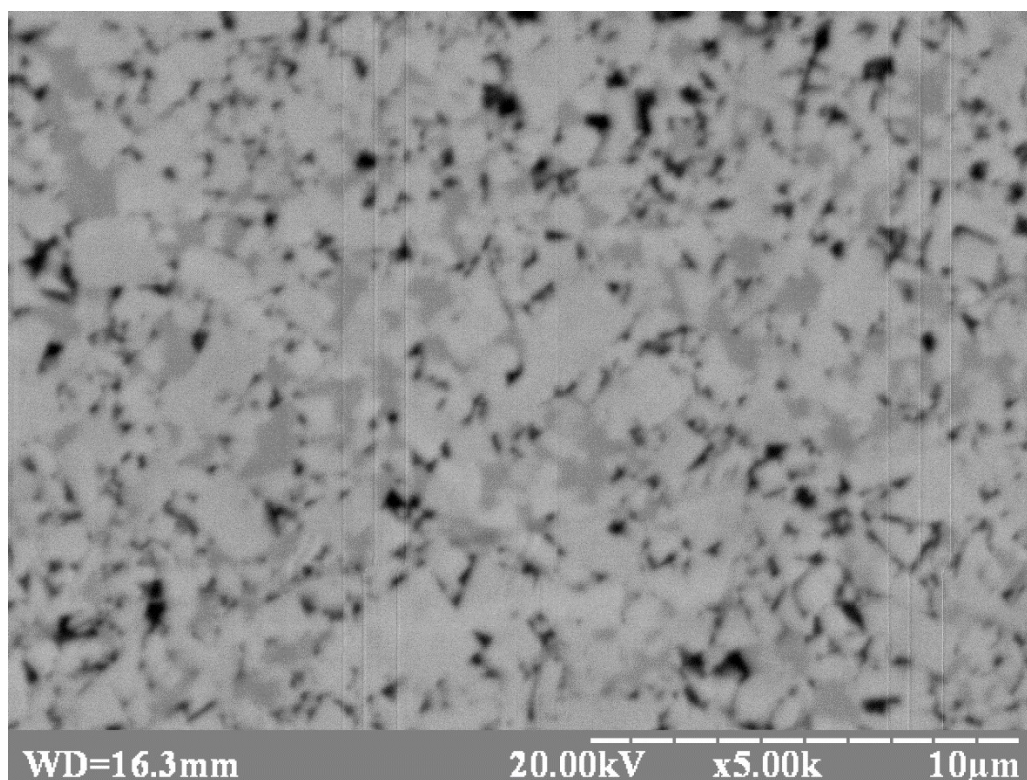


Рисунок 2.3 – Мікроструктура зразка при режимі 30/30

Отримавши данні (фото), можна визначити середній розмір зерен. Для цього скористаймося вище указаним методом. Щоб досягти максимальної точності, треба скористатися рандомайзером, тобто програмою по підбору випадкових чисел, щоб отримати дійсно випадкові числа.

Перший етап, це визначити межі підбору. Нехай межами підбору будуть геометричні краї фота шліфа. Для полегшення роботи скористаймося програмою Компас-3D, котра ідеально підійде для виконання нашого завдання. Ілюстрація представлена на рисунку 2.4.

Після того, як ми визначили межі, необхідно власне скористатися рандомайзером. Для цього був обраний «Генератор чисел онлайн» [37].

Попередньо було обумовлено, що перше число буде першою точкою, координати котрого будуть $(0; Y)$, тобто точка буде лежати на осі ординат. Отже, шукані координати першої точки – $(0; 226)$.

Аналогічно знаходимо координати другої точки. Так само обумовлюємося, що вона лежить на осі абсцис, тобто має координати $(X; 0)$. Це робиться для того, щоб зменшити кількість генеруємих чисел. Після запуску отримуємо

координати (41; 0).

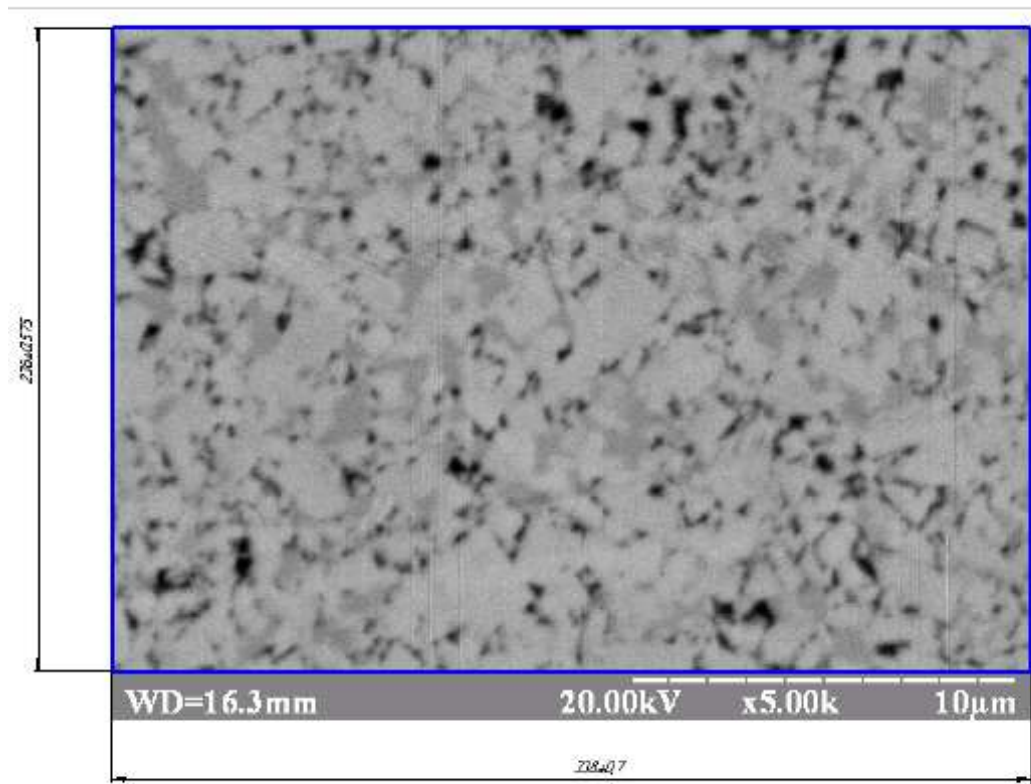
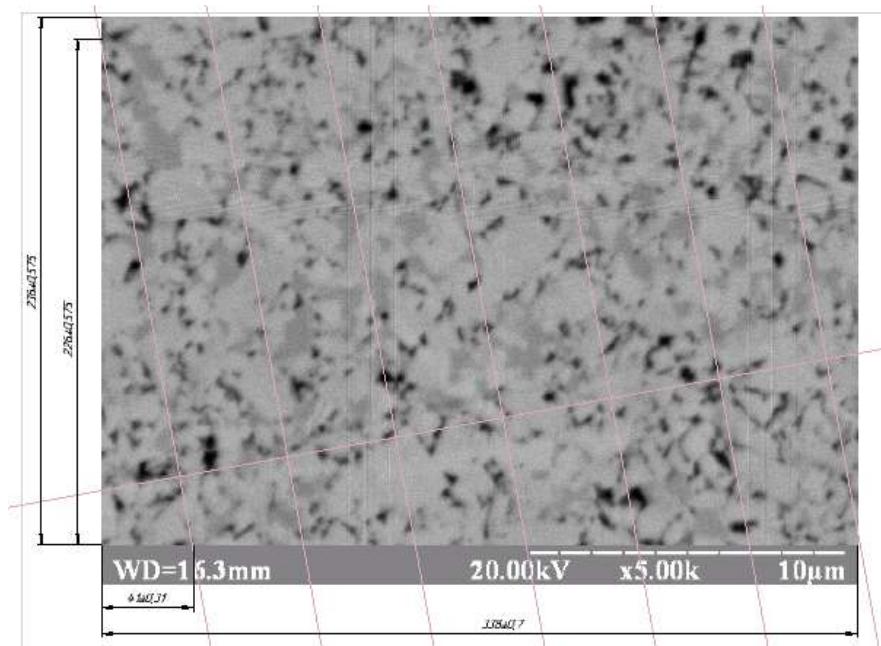


Рисунок 2.4 – Визначення геометричних границь

Також, формуємо базисну направляючу, котра перпендикулярна до нашої прямої. Знаходимо її координати. Будемо вважати, що відлік йде від осі абсцис. Після запуску генератора випадкових чисел, отримуємо число 31. Отже нам необхідно провести пряму на відстані 31 від перетину першої базисної прямої із віссю абсцис. Останній крок – загальна кількість паралельних прямих, котрі є січними в нашому випадку й перетинатимуть зерне у випадкових місцях. Отримана кількість прямих 7, так само є результатом генерації випадкових чисел.

Отриманий результат зображено на рисунку 2.5.



лінія 1 – базисна пряма; лінія 2 – базисна направляюча

Рисунок 2.5 – Сформований результат зображення після генерації

Абсолютно всі числа були отримані випадково, тобто можна очікувати на достовірний результат.

Тепер, можна розпочати власне вимір параметрів та розмірів, що нас цікавлять. Для цього поступово обводимо межі границь зерен. Певний етап цього дійства представлено на рисунку 2.6.

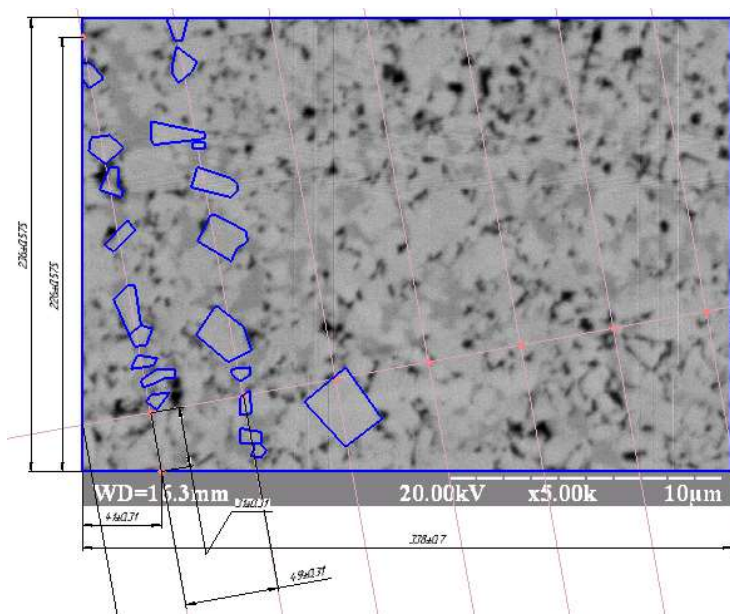


Рисунок 2.6 – Етап заповнення по визначенню границь зерен

Слід завчасно зауважити, що використані випадкові числа для побудови базисних прямих будуть використовуватися і для наступних мікрофотографій, так як доцільність для випадкової генерації чисел відсутня, бо фактор випадковості вже було досягнуто на першій генерації чисел.

Готовий результат приймає наступний вигляд (рис. 2.7):

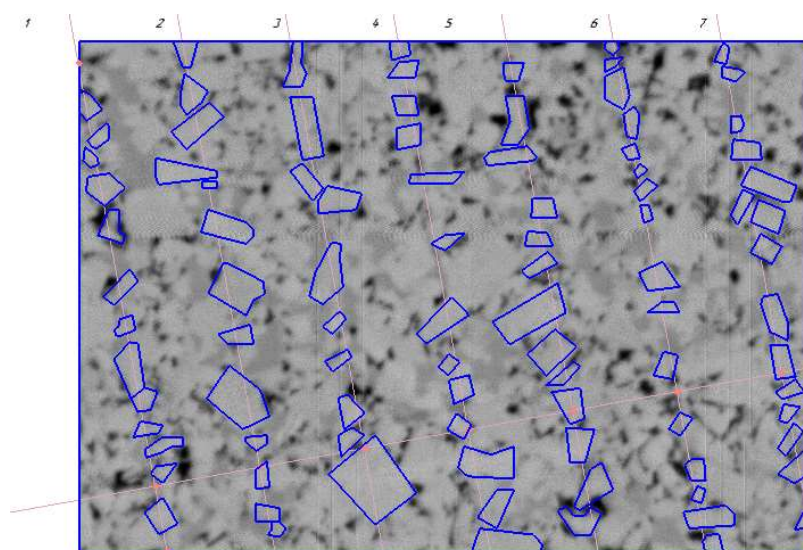


Рисунок 2.7 – Зображення із виділеними межами границь зерен

Для полегшення обробки та аналізу інформації пропонується її подача через таблиці. В таблиці 2.6 зібрано дані по першій прямій а в таблиці 2.7 по всіх семи.

Таблиця 2.6 – Значення показників на першій прямій

| Номер зерна | Розмір, <i>мкм</i> | Площа, <i>мкм</i> ² | Периметр, <i>мкм</i> |
|-------------|--------------------|--------------------------------|----------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1 | 9,85 | 68,98 | 27,83 |
| 2 | 4,55 | 50,10 | 25,77 |
| 3 | 3,29 | 30,69 | 19,98 |
| 4 | 11,19 | 129,72 | 38,87 |
| 5 | 8,96 | 85,63 | 36,25 |
| 6 | 5,93 | 80,66 | 35,48 |
| 7 | 5,52 | 44,91 | 24,46 |

Продовження таблиці 2.6

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|------------------|-------|--------|--------|
| 8 | 18,12 | 167,65 | 48,61 |
| 9 | 6,78 | 66,45 | 27,73 |
| 10 | 4,75 | 46,63 | 26,44 |
| 11 | 3,42 | 62,40 | 35,30 |
| 12 | 2,29 | 41,78 | 24,71 |
| 13 | 10,98 | 104,21 | 36,14 |
| Сума | 95,63 | 979,81 | 407,57 |
| Середнє значення | 7,36 | 57,98 | 31,35 |

Таблиця 2.7 – Узагальнена таблиця значень

| № Прямой | кількість зерен | Середній розмір зерна, мкм | Середня площа зерна, мкм | Середній периметр зерна, мкм |
|------------------|-----------------|----------------------------|--------------------------|------------------------------|
| 1 | 13 | 7,36 | 75,37 | 31,35 |
| 2 | 13 | 7,91 | 91,03 | 36,69 |
| 3 | 10 | 10,49 | 126,03 | 43,62 |
| 4 | 13 | 5,85 | 99,58 | 34,67 |
| 5 | 13 | 8,34 | 86,47 | 40,47 |
| 6 | 16 | 7,35 | 42,90 | 25,28 |
| 7 | 15 | 7,57 | 31,11 | 30,99 |
| Середнє значення | 13,29 | 7,84 | 78,93 | 34,72 |

Завершальним етапом є підрахунок кількості ета фази (η). Для цього, аналогічно попереднім пунктам, скористаймося Компасом-3D. Зображення після обробки приймає наступний вигляд, показаний на рисунку 2.8:

Зробивши не складні математичні розрахунки, отримуємо загальний наближений вміст ета фази $\eta=9,7\%$.

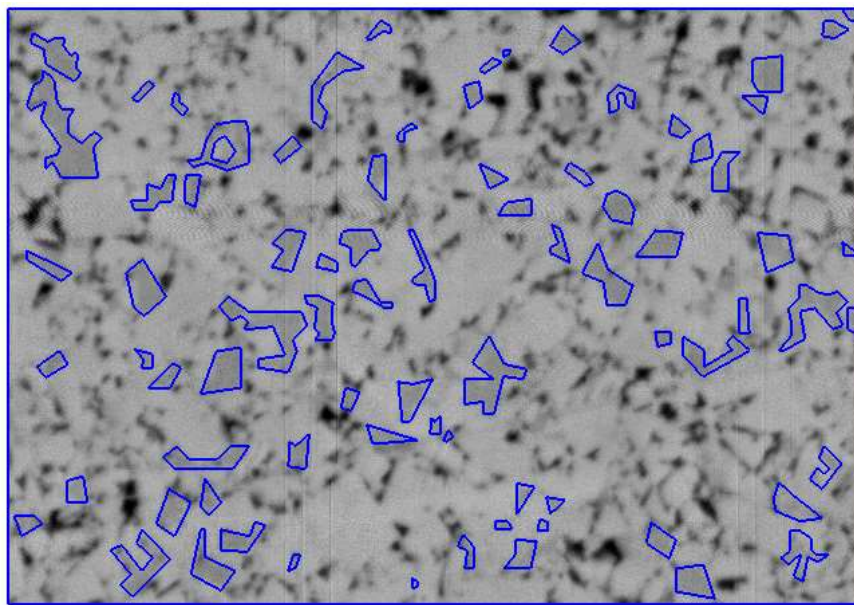


Рисунок 2.8 – Виділення η-фази

Виконавши аналогічно для всіх інших режимів дії, отримуємо таблицю вмісту η-фази та габаритів зерен, представлену далі в таблиці 2.8:

Таблиця 2.8 – Показники значень

| Режим/ характеристика | Умовний розмір, мкм | S, середня площа, мкм ² | P, Середній периметр, мкм | Вміст η-фази, % |
|--------------------------|------------------------|--|---------------------------------|--------------------|
| 30/30 | 7,84 | 78,93 | 34,72 | 7,7 |
| 15/30 | 5,85 | 46,03 | 27,89 | 4,8 |
| 2/30 | 6,32 | 57,89 | 30,23 | 5,2 |
| 30/15 | 7,89 | 49,39 | 33,33 | 7,9 |
| 15/15 | 6,01 | 51,20 | 29,11 | 5,1 |
| 2/15 | 7,23 | 57,02 | 35,54 | 6,0 |
| 30/0 | 8,22 | 57,41 | 33,31 | 7,8 |
| 15/0 | 6,02 | 59,04 | 29,09 | 6,3 |
| 2/0 | 8,26 | 71,34 | 41,22 | 8,1 |

2.8 Хімічний аналіз

Хімічний аналіз було проведено з допомогою скануючого електронного мікроскопа *Selmi* РЕМ-106И, а саме його енергодисперсійної приставки.

Проводилося ідентифікування фаз в мікроструктурі на наявність елементів, з котрих вони складаються (рис. 2.9). Результати точкового аналізу представлені в таблиці 2.12.

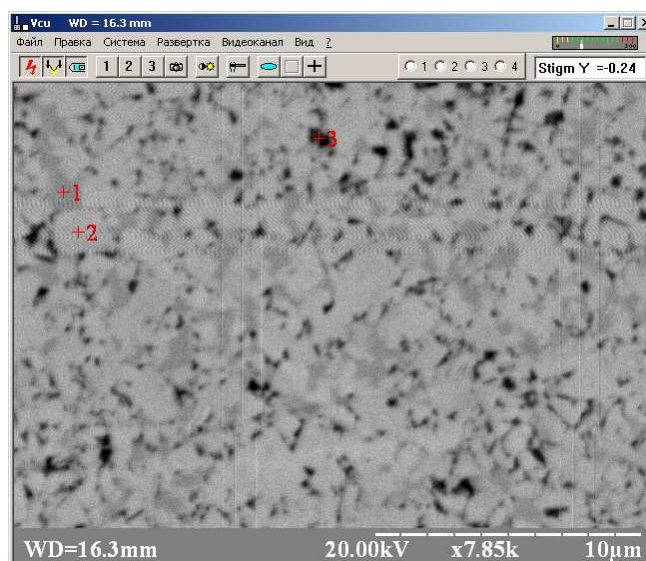


Рисунок 2.9 – Ділянка мікроструктури, на котрій проводився хімічний аналіз

Таблиця 2.12 – Результати хімічного аналізу

| Елемент | Фаза 1 | | Фаза 2 | | Фаза 3 | |
|---------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|
| | Інт. | С, % | Інт. | С, % | Інт. | С, % |
| Cr (K) | 125 | 6,14 | 10 | 0,50 | 74 | 3,31 |
| ×Cr (L) | 0 | 0,00 | 0 | 0,00 | 1 | 0,00 |
| Fe (K) | 47 | 2,83 | 5 | 0,27 | 76 | 4,73 |
| ×Fe (L) | -1 | 0,00 | 0 | 0,00 | 0 | 0,00 |
| Co (K) | 520 | 31,80 | 30 | 1,59 | 939 | 61,32 |
| ×Co (L) | -5 | 0,00 | -4 | 0,00 | -1 | 0,00 |
| ×W (L) | 637 | 0,00 | 795 | 0,00 | 455 | 0,00 |
| W (M) | 1201 | 59,24 | 1629 | 97,64 | 777 | 30,65 |

2.9 Дослідження ударної в'язкості

Випробування на ударну в'язкість засноване на тому, що зразок має концентратор посередині.

Згідно ГОСТУ 9454-78 [38] поділяють наступні зразки на випробування:

1. Зразки Шарпі - зразки перетином 10×10 мм, довжиною 55 мм і з U-подібним надрізом шириною і глибиною 2 мм і радіусом 1 мм.
2. Зразки Менаж - зразки того ж перетину і довжини і V-подібним надрізом тієї ж геометрії, що і перший зразок.
3. Т-образні зразки довжиною 55 мм, висотою 11 мм і шириною 10 мм з Т-образним концентратором (надріз, що імітує втомну тріщину).

При випробуванні металів на удар визначають ударну в'язкість. Ударна в'язкість КС - це відношення роботи до руйнування стандартного зразка до площі його поперечного перерізу F в місці надрізу [39]:

$$КС = \frac{K}{F}, \text{Дж} / \text{м}^2.$$

Випробування на ударну в'язкість проводять на копрах маятникового типу, як показано на рисунку 2.10 [41].

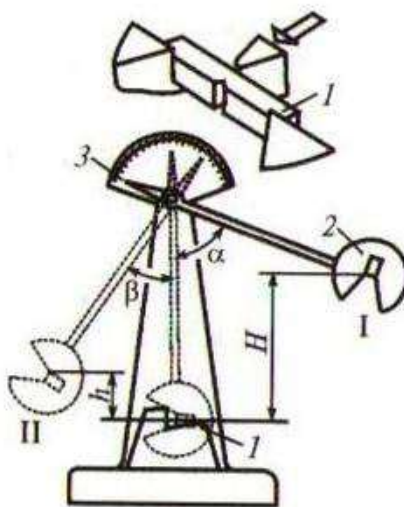


Рисунок 2.10 – Схема ударного випробування зразків на маятниковому копрі [41]

Результати вимірювань ударної в'язкості представлені в таблиці 2.13.

Таблиця 2.13 – Показники значень ударної в'язкості

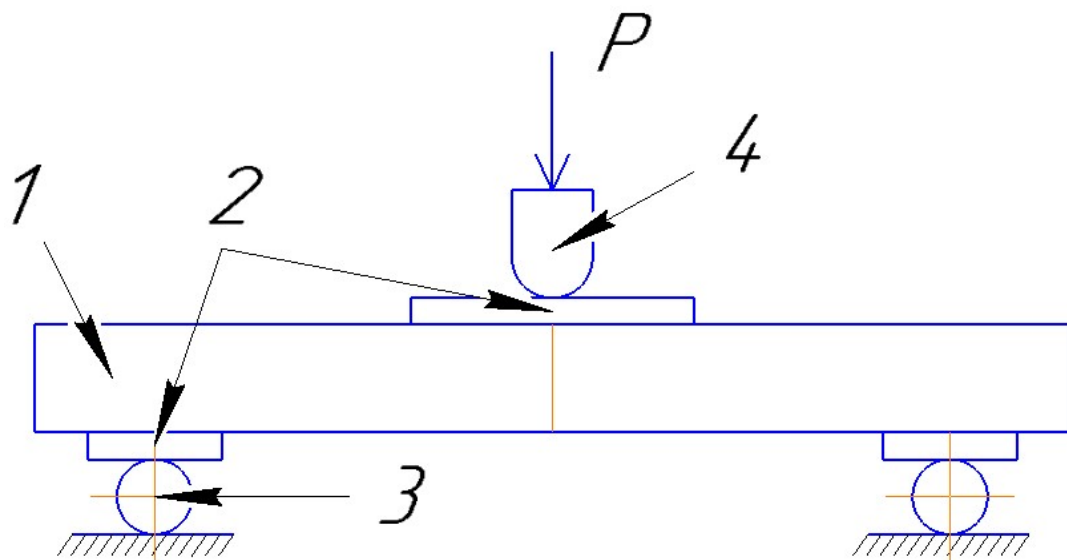
| Режим | 30/30 | 15/30 | 2/30 | 30/15 | 15/15 | 2/15 | 30/0 | 15/0 | 2/0 |
|---|-------|-------|------|-------|-------|------|------|------|------|
| Ударна в'язкість, кДж/м ² | 31,2 | 32,1 | 32,4 | 30,9 | 31,7 | 32,0 | 31,5 | 32,5 | 33,1 |

2.10 Дослідження межі міцності на згин

Також було проведене випробування межі міцності на згин. Висушений зразок укладають на дві опори лицьовою поверхнею догори і прикладають по середині зразка навантаження [40]. Схема наведена на рисунку 2.11.

Між опорами і зразком, а також між деталлю, що передає навантаження, і зразком розміщують гумові прокладки. Вимірюється ширина і товщина зразка.

Відстань між опорами повинна бути встановлена у межах 80...90% від довжини зразка. Навантаження слід прикладати рівномірно, без товчків, до руйнування.



1 – зразок; 2 – гумова прокладка;

3 – опора; 4 – деталь, що передає навантаження

Рисунок 2.11 – Схема випробування на згин

Границю міцності при згині в МПа обчислюють за формулою

$$R_{\text{зг}} = \frac{3Pl}{bh^2},$$

де P – руйнівне навантаження, Н;

l – відстань між осями опор, мм;

b – ширина зразка, мм;

h – товщина зразка, мм.

Результати вимірювань межі міцності представлені в таблиці 2.10.

Таблиця 2.10 – Показники значень межі міцності

| Режим | 30/30 | 15/30 | 2/30 | 30/15 | 15/15 | 2/15 | 30/0 | 15/0 | 2/0 |
|------------------------------|-------|-------|------|-------|-------|------|------|------|------|
| Межа міцності при згині, МПа | 1750 | 1730 | 1700 | 1740 | 1730 | 1700 | 1740 | 1710 | 1680 |

2.11 Розрахунок абсолютної міцності

Значення ідеальної міцності відповідно до одновимірного стискування можна оцінювати як тиск в мінімумі ударної адіабати речовини, що екстраполюється в область розтягнення [30]:

$$\sigma_{id} = \frac{\rho_0 c_0^2}{4b},$$

де c_0 , b – коефіцієнти лінійного вираження для ударної адіабати

В даних розрахунках вважається, що температура дорівнює абсолютному нулю. Зрозуміло, що із зростанням температури значення ідеальної міцності зменшується. Ілюстрація ступеня реалізації ідеальної міцності представлена на рисунку 2.12.

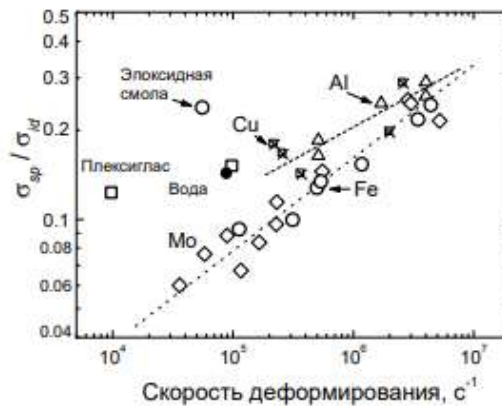


Рисунок 2.12 – Ступінь реалізації ідеальної міцності гомогенних матеріалів при відколі в залежності від швидкості деформування

В даному випадку швидкість деформування необхідно вважати наступним – це швидкість розширення речовини в хвилі розрідження перед імпульсом, що володіє скольним ефектом, котрий розраховується як:

$$\frac{\dot{V}}{V_0} = -\frac{\dot{u}_{f.s.r}}{2c_b},$$

де $\dot{u}_{f.s.r}$ - темп падіння швидкості вільної поверхні перед виходом на неї скольного імпульсу.

Значення абсолютної міцності різних матеріалів та розрахованої для ВК8 представлена в таблиці 2.11.

Таблица 2.11 – Порівняльна таблиця значень абсолютної міцності

| Речовина | Значення σ_{id} | σ_{id} при 300 К |
|-----------------|------------------------|-------------------------|
| 1 | 2 | 3 |
| Вода | 0.28 | - |
| Епоксидна смола | 1.34 | - |
| ПММА | 1.39 | - |
| Алюміній | 13.4 | 11.7 |

Продовження таблиці 2.11

| 1 | 2 | 3 |
|----------|------------------------|-------------------------|
| Мідь | 23.3 | 19.8 |
| Залізо | 31.6 | 27.7 |
| Молібден | 55.0 | 42.3 |
| Речовина | Значення σ_{id} | σ_{id} при 300 К |
| Вольфрам | 105.4 | 79.1 |
| ВК8 | 81.1 | 67.6 |

Дану таблицю можна також пояснити через залежність напруження пластичної течії кристалічного тіла від щільності дислокацій, схема котрої представлена на рисунку 2.13.



Рисунок 2.13 – К поясненню про межу текучості та густину дислокацій

2.12 Оптимізація режимів спікання

2.12.1 Регресійна модель

Основним методом при оптимізації певного фактору вже довгі роки є метод побудований композиційному плані. Скористаймося методом найменших квадратів та знайдемо коефіцієнти регресії окремо для кожного параметру, що нас цікавить [41].

Для кожного параметра підхід буде однаковим, тому пропонується

розглянути на прикладі лише одного вихідного параметру.

Складаємо таблицю, де $X1$, $X2$ – умови режимів спікання, а Y – середнє значення площі, S (табл. 2.12).

Таблиця 2.12 – Вхідні данні регресійної моделі

| № | $X1$ | $X2$ | Y |
|---|------|------|-------|
| 1 | 30 | 30 | 78,93 |
| 2 | 15 | 30 | 46,03 |
| 3 | 2 | 30 | 57,89 |
| 4 | 30 | 15 | 49,39 |
| 5 | 15 | 15 | 51,20 |
| 6 | 2 | 15 | 57,02 |
| 7 | 30 | 0 | 57,41 |
| 8 | 15 | 0 | 59,04 |
| 9 | 2 | 0 | 71,34 |

Рівняння формули приймає наступний вигляд:

$$y = 79,0414 - 2,2708x_1 - 1,9527x_2 + 0,0508x_1^2 + 0,0411x_2^2 + 0,0425x_1x_2$$

Після того, як було отримано рівняння функції, можна розрахувати її значення в окремих точках.

Очевидно, що розрахункові та експериментальні дані будуть відрізнятись, тому запишемо ще додатковий стовпчик із залишком.

Для спрощення інформації, складемо наступну таблицю 2.13 експериментальних значень та розрахованих.

Таблиця 2.13 – Вихідні данні регресійної моделі

| № | $Y_{\text{експериментальне}}$ | $Y_{\text{розрахункове}}$ | Залишок |
|---|-------------------------------|---------------------------|----------|
| 1 | 78,93 | 73,3084 | 7,1222 |
| 2 | 46,03 | 53,9203 | -17,1417 |
| 3 | 57,89 | 55,6213 | 3,9190 |
| 4 | 49,39 | 55,7522 | -12,8816 |
| 5 | 51,20 | 45,9322 | 10,2886 |
| 6 | 57,02 | 55,9256 | 1,9194 |
| 7 | 57,41 | 56,6694 | 1,2901 |
| 8 | 59,04 | 56,4175 | 4,4420 |
| 9 | 71,34 | 74,7032 | -4,7143 |

Інші залежності будуть мати аналогічну форму поліному, типу:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_1^2 + a_4x_2^2 + a_5x_1x_2,$$

Запишемо коефіцієнти регресійного аналізу для інших величин в таблицю 2.13 та вже результат розрахунку в таблицю 2.14.

Таблиця 2.13 – Коефіцієнти регресійного аналізу

| № | S | P | D | η | HRa |
|-------|---------|---------|---------|---------|---------|
| a_0 | 79,0414 | 42,9127 | 8,5754 | 8,4865 | 87,9734 |
| a_1 | -2,2708 | -1,2853 | -0,2708 | -0,2748 | 0,0057 |
| a_2 | -1,9527 | -0,3586 | -0,0614 | -0,1444 | -0,0284 |
| a_3 | 0,0508 | 0,0313 | 0,0084 | 0,0086 | 0,0005 |
| a_4 | 0,0411 | 0,0004 | 0,0002 | 0,0014 | 0,001 |
| a_5 | 0,0425 | 0,0145 | 0,0018 | 0,0033 | 0,0017 |

Таблиця 2.14 – Таблиця результатів регресійного аналізу

| № | S | P | D | η | HRa |
|-------------------|---------|---------|--------|--------|---------|
| Y1 _{екс} | 78,93 | 34,72 | 7,84 | 7,7 | 90,3 |
| Y1 _{роз} | 73,3084 | 35,1425 | 7,9688 | 7,8710 | 90,1367 |
| Y2 _{екс} | 46,03 | 27,89 | 5,85 | 4,8 | 88,9 |
| Y2 _{роз} | 53,9203 | 26,7824 | 5,5409 | 4,7223 | 88,9944 |
| Y3 _{екс} | 57,89 | 30,23 | 6,32 | 5,2 | 88,1 |
| Y3 _{роз} | 55,6213 | 30,9150 | 6,5003 | 5,1067 | 88,1689 |
| Y4 _{екс} | 49,39 | 33,33 | 7,89 | 7,9 | 88,8 |
| Y4 _{роз} | 55,7522 | 33,7311 | 7,9556 | 7,5889 | 89,1111 |
| Y5 _{екс} | 51,20 | 29,11 | 6,01 | 5,1 | 88,5 |
| Y5 _{роз} | 45,9322 | 28,6411 | 5,9322 | 5,1889 | 88,3444 |
| Y6 _{екс} | 57,02 | 35,54 | 7,23 | 6,0 | 88,0 |
| Y6 _{роз} | 55,9256 | 35,6078 | 7,2422 | 6,2222 | 87,8444 |
| Y7 _{екс} | 57,41 | 33,31 | 8,22 | 7,8 | 88,7 |
| Y7 _{роз} | 56,6694 | 32,4864 | 8,0257 | 7,9401 | 88,5522 |
| Y8 _{екс} | 59,04 | 29,09 | 6,02 | 6,3 | 88,1 |
| Y8 _{роз} | 56,4175 | 30,6664 | 6,4069 | 6,2888 | 88,1611 |
| Y9 _{екс} | 71,34 | 41,22 | 8,26 | 8,1 | 87,9 |
| Y9 _{роз} | 74,7032 | 40,4672 | 8,0675 | 7,9711 | 87,9867 |

2.12.2 Окремі блоки програми по генерації будови

В даному випадку слід поговорити про основні блоки, функції та процедури. Мовою написання програми є *Delphi* - структурована об'єктно-орієнтована високорівнева мова програмування. Написання коду складається з надавання властивостей об'єктам на канвасі, кожен з котрих має чітку позицію. Для зменшення кількості сторінок буде розглядатися по одній функції чи її окремого моменту з необхідними коментарями [42].

Робота розпочинається із нанесення об'єктів на канвас, після чого вже йде власне програмування.

Слово *Type* є ключовим, котре дає змогу створити нову змінну не стандартної категорії. Приклад наведений далі:

```
type
arr= array[0..100,0..100] of real;
```

Потім йде запис змінних:

```
var
Gm, fm: arr;
```

Наступний крок – задання власних функцій, вигляд яких і є шуканим раніше поліномом:

```
function G(x1,x2: real): real;
begin
  G:=a0+a1*x1+a2*x2+a3*x1*x1+a4*x2*x2+a5*x1*x2
end;
```

Вводимо процедури, на запис значень:

```
procedure normG(Gm: arr; m: integer; var s: integer; var
iG,jG: ar);
var
  Gmin,Gmax: real;
  i,j: integer;
```

Після цього, можна розпочати роботу на основним розділом, котрий символізується використанням слова *begin*:

```
begin
a0:=strtofload(Edit1.Text);
Gmin:=strtofload(Edit19.Text);
```

де, *strtofload* – функція переходу від значення типу «строка», яким було наше число, котре ми ввели в поле, до тупи чисел із плаваючою комою.

Блок функції *For/if* реалізовує перебір та пошук шуканих точок, що задовольняють умови:

```

for i:=0 to m do begin
  for j:=0 to m do begin
    if (Gmin<=Gm[i,j]) and (Gm[i,j]<=Gmax) then begin
      ig[s]:=i;
      jG[s]:=j;
      s:=s+1;
    end;
  end;
end;
m:=strtoint(Edit30.Text);;
x1min:=4.8;
x1max:=8.1;
...
n:=(x1max-x1min)/m;
...
x1:=x1min;
...
for i:=0 to m do begin
  for j:=0 to m do begin
    Gm[i,j]:=G(x1+n*i,x2+h*j);
  end;
end;

```

Останній блок – виведення даних на екран через поля;

```
Edit21.Text:=('Знайдено!!!');
```

Додатково було виконано програмування кнопки для очистки екрану, для полегшення робити:

```

procedure TForm2.Button3Click(Sender: TObject);
begin
  edit1.clear;
...

```

Таким чином, було одержано розрахункові режими, та відповідні до них

властивості матеріалів.

Так як частина коду не наведена, то для роз'яснення наведена таблиця, в котрій вказано тип функції – мінімізація чи максимізація того, чи іншого параметру, та діапазони значень із результатами розрахунків.

Провести оптимізацію для всіх параметрів одночасно не вдалося, однак можна за відомим рівнянням регресії та вже отриманим значенням часу спікання знайти останні параметри.

Слід також зауважити що було отримано декілька точок, проте нами була обрана одна, найбільш оптимальна з нашої точки зору.

Більш детально інші точки буде розглянуто в наступних розділах.

В таблиці наведений тип функції *min* або *max*, тобто йде пояснення за яким принципом виконувався перебір. Для зручності наведені аббревіатури від величин.

Загальний результат оптимізації наведений у таблиці 2.14:

Таблиця 2.14 – Крайні значення параметрів та їх оптимальне значення

| | $t_{cник}$ | t_{non} | d | P | S | HRa | η | Ud | $Zgin$ | Id |
|------------|------------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|------|--------|-------|
| F_{type} | - | - | <i>min</i> | <i>min</i> | <i>min</i> | <i>max</i> | <i>min</i> | - | - | - |
| $F(min)$ | - | 0 | 0,1 | 26,0 | 46,0 | 88,0 | 4,0 | - | - | - |
| $F(max)$ | - | 30 | 7,0 | 33,0 | 60,0 | 89,0 | 6,0 | - | - | - |
| F_{onm} | 12 | 30 | 5,6 | 26,4 | 53,2 | 88,8 | 4,6 | 32,1 | 1725 | 88,87 |

2.13 Модель розповсюдження тріщини

2.13.1 Математична модель побудови структури

Так як одним із першочергових завдань була побудова математичною моделі руйнування зразків виготовлених із твердих сплавів, то генерування структури зерен є досить очевидним із перших кроків, якщо справа йде про двовимірну модель. Для цього, довелося скористатися вже не середовищем Delphi, а мовою програмування C++ та окремим візуальним пакетом *SFML (Simple and Fast Multimedia Library)*, так як для роботи з графікою в плані зображення ця мова

більше заточена під це.

Так як і в попередньому випадку програма складається з чіткого розташування блоків. Так як в цьому випадку програма носить цінність виключно як код, то розберемо лише декілька моментів.

```
#include <SFML/Graphics/RenderTexture.hpp>
#include <SFML/Graphics/ConvexShape.hpp>
#include <SFML/Graphics/CircleShape.hpp>
...
```

Пропонування підключення компілятору іншого файлу, в нашому випадку – бібліотек SFML.

```
float sizeX = 500.0f;
float sizeY = 500.0f;
...
Задання розмірів: генерації, площ, периметрів, відстаней та інше.
void build(sf::Vector2f origin, float rotation)
{
    int i = 10000;
    while (i--){
std::cout << std::endl;
std::cout << "origin:" << origin.x << " " << origin.y <<
std::endl;
for (int i = 0 ; i < 4; i ++){
verts.push_back({0, 0});
float side0 = rerp(minPerimeter, maxPerimeter)/4.0f;
float side1 = rerp(minPerimeter, maxPerimeter)/4.0f;
float side2 = rerp(minPerimeter, maxPerimeter)/4.0f;
float side3 = rerp(minPerimeter, maxPerimeter)/4.0f;
std::cout << "sides:" << side0 << " " << side1 << " " <<
side2 << " " << side3 << std::endl;
td::cout << "sum:" << side0 + side1 + side2 + side3 <<
std::endl;
```

... .

Блок по побудові чотирикутника. Вивід та побудова малюнка так само знаходиться в додатку А.

Як результат, після оптимізації режимів та отримання певних значень габаритів зерен, можна математично побудувати та зобразити структуру нашого нового матеріалу.

Приклад першого запуску програми зображений на рисунку 2.14:

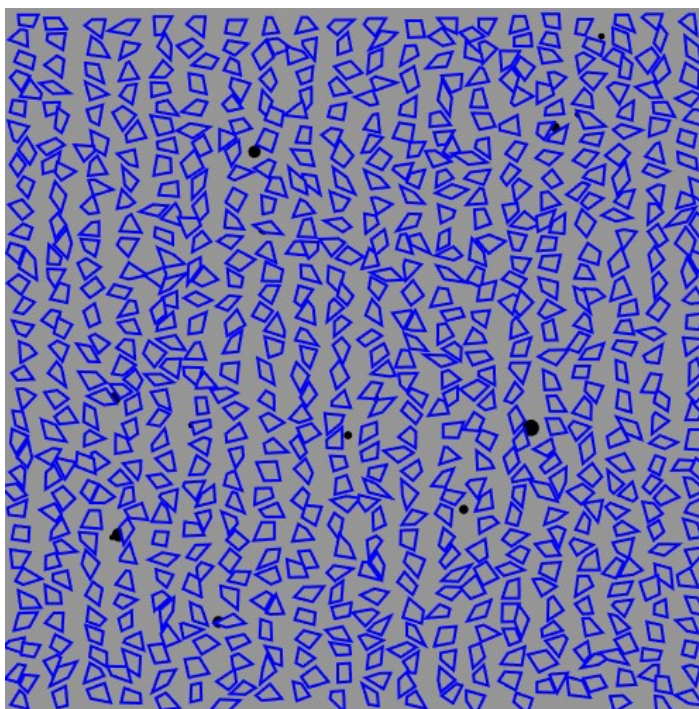


Рисунок 2.14 – Генерація структури

2.13.2 Математична модель проходження тріщини

Моделі поведінки тріщин вже цікавлять людство давно і вже є достатня кількість моделей, що описують це явище. На разі розрізняють наступні методи оцінки:

- аналітичні методи;
- метод кінцевих елементів;
- прямий метод;
- енергетичний метод;

– метод спеціальних елементів.

Тим не менш, останнім часом набуває популярність штучний інтелект. Очевидно, що власних домашніх ресурсів для побудови повноцінної моделі недостатньо, проте можна побудувати спрощену модель на загальних принципах.

Загальні принципи полягають в наявності функцій вартості та штрафних функцій. Після кожного запуску програми можна було б коректувати поведінку програми в тому, чи іншому випадку, проте для цього необхідне чітке розуміння процесу. Наша спрощена модель складається з поля, розділеного на три

В програмуванні широко розповсюджений метод розбиття зображення на трикутники. Такий самий принцип присутній і в реалізації енергетичного методу при побудові візуального зображення.

Розпочнемо з пошуку коефіцієнтів важливості. Для пояснення зробимо уточнення, що далі використовуються наступні аббревіатури для критеріїв: η – скупчення ета-фази, Π – пори, S – площа зерна, P – периметр.

Кількість ланок для обходу по найкоротшому маршруту, один із обраних критеріїв оцінки для побудови штрафних функцій (він же критерій огинання). Це необхідний критерій, через наявність концентраторів напружень, так як наша модель побудована на тому, що у тріщини є вхід та вихід (ліва сторона прямокутника та права), і вона прагне дійти до правої сторони. Фактор обходу перешкоди за найменшим маршрутом допомагає реалізувати цю задану необхідність. Якби вихід не був штрафною функцією, яка б зменшувала значення функції на виході, то тріщина зациклювалася б всередині зони намагаючись навпаки зібрати як умога більше точок. Для додаткового вирішення цієї проблема маршрут зводиться до мінімалізації значення функції на виході. Ілюстрація про найкоротший шлях зображена на рисунку 2.15., а про вихід з циклу на рисунку 2.16.

на рисунку 2.17.

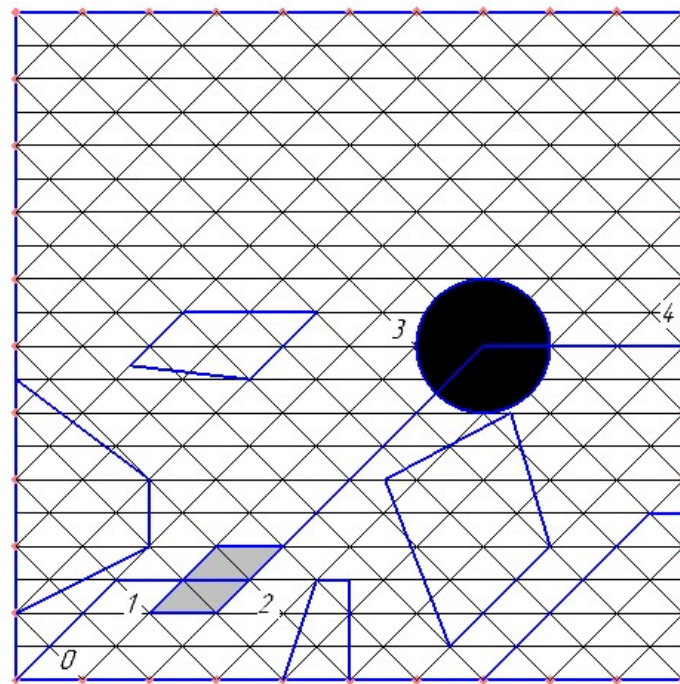


Рисунок 2.17 – К поясненню про «упор»

Після того, як було введено всі терміни можна розпочати роботу по знаходженню ваг штрафних функцій.

Для цього, оберемо довільні коефіцієнти для наших функцій так, щоб не було великої різниці між ними. Сума коефіцієнтів спершу рівна одиниці:

$$\omega_1 = \omega_\eta = 0,2; \quad \omega_2 = \omega_\Pi = 0,2; \quad \omega_3 = \omega_S = 0,3; \quad \omega_4 = \omega_P = 0,3.$$

Наступний крок, заповнення матриць, де порівнюються наші функції відносно критеріїв η , Π , S , P . Тобто на кожному критерію оцінюється важливість того чи іншого фактору.

$$\eta > \Pi > S = P;$$

$$\eta > P > S > \Pi;$$

$$P = S > \Pi > \eta;$$

$$P > S > \eta > \Pi;$$

$$\mu_{R1} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \mu_{R2} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}; \mu_{R3} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}; \mu_{R4} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix};$$

Будуємо наступну матрицю шляхом перемноження існуючих:

$$\mu_Q = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Знаходимо різницю між елементами $A_{i,j}$ та $B_{j,i}$:

$$\begin{aligned} A_1 &= (\mu_{Q1,1} - \mu_{Q1,1} \quad \mu_{Q1,2} - \mu_{Q2,1} \quad \mu_{Q1,3} - \mu_{Q3,1} \quad \mu_{Q1,4} - \mu_{Q4,1}); \\ A_2 &= (\mu_{Q2,1} - \mu_{Q1,2} \quad \mu_{Q2,2} - \mu_{Q2,2} \quad \mu_{Q2,3} - \mu_{Q3,2} \quad \mu_{Q2,4} - \mu_{Q4,2}); \\ A_3 &= (\mu_{Q3,1} - \mu_{Q1,3} \quad \mu_{Q3,2} - \mu_{Q2,3} \quad \mu_{Q3,3} - \mu_{Q3,3} \quad \mu_{Q3,4} - \mu_{Q4,3}); \\ A_4 &= (\mu_{Q4,1} - \mu_{Q1,4} \quad \mu_{Q4,2} - \mu_{Q2,4} \quad \mu_{Q4,3} - \mu_{Q3,4} \quad \mu_{Q4,4} - \mu_{Q4,4}). \end{aligned}$$

Переходимо до фінальної побудови:

$$\begin{aligned} \mu 1_{н\partial} &= 1 - \max(A_1) = 1; \\ \mu 2_{н\partial} &= 1 - \max(A_2) = 1; \\ \mu 3_{н\partial} &= 1 - \max(A_3) = 1; \\ \mu 4_{н\partial} &= 1 - \max(A_4) = 1; \\ \mu_{н\partial} &= (\mu 1_{н\partial} \quad \mu 2_{н\partial} \quad \mu 3_{н\partial} \quad \mu 4_{н\partial}) = (1 \quad 1 \quad 1 \quad 1). \end{aligned}$$

Перший етап не дав відповіді на те, який з параметрів є більш важливішим за обраними критеріями. Будуємо нову згортку:

$$ABC = \mu_{R1} \cdot \omega_1 + \mu_{R2} \cdot \omega_2 + \mu_{R3} \cdot \omega_3 + \mu_{R4} \cdot \omega_4;$$

$$B = \begin{pmatrix} 1 & 0,7 & 0,4 & 0,4 \\ 0,3 & 1 & 0,2 & 0,4 \\ 0,6 & 0,6 & 1 & 0,7 \\ 0,6 & 0,8 & 0,8 & 1 \end{pmatrix};$$

$$C = \begin{pmatrix} 0 & B_{1,2} - B_{2,1} & B_{1,3} - B_{3,1} & B_{1,4} - B_{4,1} \\ B_{2,1} - B_{1,2} & 0 & B_{2,3} - B_{3,2} & B_{2,4} - B_{4,2} \\ B_{3,1} - B_{1,3} & B_{3,2} - B_{2,3} & 0 & B_{3,4} - B_{4,3} \\ B_{4,1} - B_{1,4} & B_{4,2} - B_{2,4} & B_{4,3} - B_{3,4} & 0 \end{pmatrix};$$

$$C = \begin{pmatrix} 0 & 0,4 & -0,2 & -0,2 \\ -0,4 & 0 & -0,4 & -0,4 \\ 0,2 & 0,4 & 0 & -0,1 \\ 0,2 & 0,4 & 0,1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Так, як в даній матриці можуть бути елементи рівні нулю або більше нуля, то відсіємо від'ємні елементи:

$$C_{Abs} = \begin{pmatrix} 0 & 0,4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,2 & 0,4 & 0 & 0 \\ 0,2 & 0,4 & 0,1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Тоді оцінка критеріїв за важливістю буде наступною:

$$\mu_{н02} = (1-0,2 \quad 1-0,4 \quad 1-0,1 \quad 1-0);$$

$$\mu_{н02} = (0,8 \quad 0,6 \quad 0,9 \quad 1).$$

Як видно з останньої оцінки, найкращим впливом в нашому випадку буде периметр зерна. Для спрощення відкинемо елемент площі. Відповідно до цього, можна вже почати будувати загальну функцію. Одною з головних проблем залишається саме встановлення оцінок тому, чи іншому фактору. Так, як встановити занадто низький коефіцієнт на вихід, то тріщина одразу спрямується за

максимально коротким із можливих маршрутів. Якщо ж встановити великий коефіцієнт на огинання, то можлива ситуація, коли тріщина за один крок від виходу спрямується в іншому напрямку (рис. 2.18).

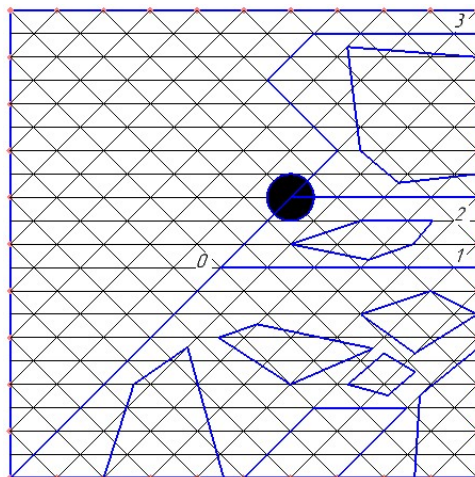


Рисунок 2.18 – К поясненню про проблему вибору напрямку

Оцінивши наші коефіцієнти, можна скласти оцінювання відстані, ілюстрація котрої знаходиться на рисунку 2.19:

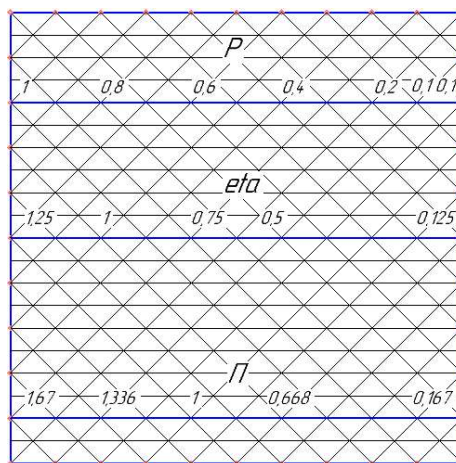


Рисунок 2.19 – К поясненню про оцінювання ланки

Дане розташування коефіцієнтів необхідне, так, якщо початок прямої згенерується в центрі, а відстань до концентраторів напружень буде однаковою, то завдяки коефіцієнтам відстаней, пряма обере той напрям, де значення функції буде мінімальною в порівнянні з іншими маршрутами.

Експериментально встановлено, що наступна функція дає достатньо стабільний результат:

$$F(\min) = 10000 \frac{\sum (\alpha_{1i} \cdot \alpha_{2i} \cdot \alpha_{3i})}{L_{огин} \cdot L_{упор} \cdot L_{заг}^2};$$

де, $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – вагові коефіцієнти P , η та Π відповідно;

$L_{огин}$ – кількість ланок до обходження перешкоди;

$L_{упор}$ – кількість ланок, що знаходяться в зоні η -фази або в порі.

Побудувавши модель та маючи можливість згенерувати структуру, візьмемо окрему ділянку, та перенесемо дані в модель. Нажаль, зробити автоматичне розпізнавання зображення не вдалося, тому доведеться будувати вручну. Приклад такої побудови представлено на рисунку 2.20.

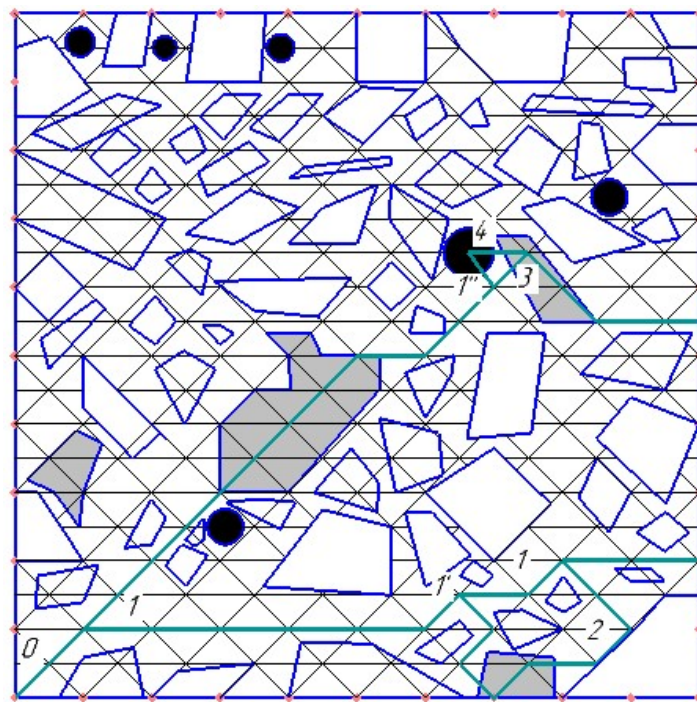


Рисунок 2.20 – Модель розповсюдження тріщини

В нашому випадку можливі лише чотири маршрути.

Для легшого сприйняття інформації, занесемо всі значення вагових

коефіцієнтів, довжин ланок в та значення функцій в таблицю 2.14:

Таблиця 2.14 – Порівняння маршрутів розповсюдження тріщини

| № | $\sum \alpha_{1i}$ | $\sum \alpha_{2i}$ | $\sum \alpha_{3i}$ | $L_{обг}$ | $L_{упор}$ | $L_{заг}$ | $F(min)$ |
|---|--------------------|--------------------|--------------------|-----------|------------|-----------|----------|
| 1 | 5,8 | - | - | 10 | - | 12 | 40,278 |
| 2 | 5,8 | 0,375 | - | 14 | 3 | 18 | 1,598 |
| 3 | 6,3 | 0,5 | - | 9 | 5 | 18 | 2,16 |
| 4 | 6,4 | 0,5 | 0,167 | 10 | 7 | 19 | 0,211 |

Таким чином одразу видно, що в нашій моделі пріоритетом є не вихід за межі, а проходження через максимальну кількість концентраторів напружень. Найкоротший маршрут – перший, але його значення функції найбільше. Якщо порівняти третій та четвертий маршрути, то тріщини збільшить свій маршрут для того, щоб отримати додаткову штрафну функцію.

3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

3.1 Дослідження структури

Аналіз структури показує наявність аномально крупних зерен. Ряд джерел [43]-[44] вказує на те, що основна причина – це неякісний порошок карбіду вольфраму. Результати наших вимірювань представлені в таблиці 3.1:

Таблиця 3.1 – Основні значення структури

| Режим | 30\30 | 15\30 | 2\30 | 30\15 | 15\15 | 2\15 | 30\0 | 15\0 | 2\0 |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Середня площа, <i>мкм²</i> | 78,93 | 46,03 | 57,89 | 49,39 | 51,20 | 57,02 | 57,41 | 59,04 | 71,34 |
| Середній периметр, <i>мкм</i> | 34,72 | 27,89 | 30,23 | 33,33 | 29,11 | 35,54 | 33,31 | 29,09 | 41,22 |
| Середній умовний розмір, <i>мкм</i> | 7,84 | 5,85 | 6,32 | 7,89 | 6,01 | 7,23 | 8,22 | 6,02 | 8,26 |
| Вміст η - фази | 7,7 | 4,8 | 5,2 | 7,9 | 5,1 | 6,0 | 7,8 | 6,3 | 8,1 |

Дослідження аномального росту зерен – це не нова, проте досить актуальна і досі тема, адже через такий брак можна виконати вироби, що технічно не будуть відповідати першочатково заданим технічним характеристикам.

Так, в роботі [43] розглядається механізм росту зерен, розподілених у твердій матриці або рідкої матриці, аналогічно механізму зростання зерна в однофазних матеріалах. Класифікування цього процесу проходить за двома категоріями. Перша категорія – процес зростання обумовлюється дифузією і залежить від швидкості дифузії розчиненого речовини через матрицю. Друга категорія – процес зростання

залежить від взаємодії розчинених дрібних зерен з рідкою фазою на міжфазній межі розділу. Сплави WC-Co, отримані рідкофазним спіканням, мають ограничену форму зерен, а в процесі спікання спостерігається інтенсивне зростання карбідного зерна.

Наприклад, після вакуумного спікання формовок з суміші порошків карбиду вольфраму WC-20 % Co і WC-40 % Co з однаковим розміром зерен карбиду вольфраму 0,5 *мкм* при температурах від 1400 °C до 1550 °C розмір зерен WC збільшується до 30 *мкм* [43]-[44].

Проблема зростання карбідного зерна гостро стоїть не тільки для сплавів з субмікронною структурою. Вона також присутня й для інших сплавів: середньозернистих (розмір карбідного зерна 2-3 *мкм*), крупнозернистих (4-6 *мкм*) і особливо крупнозернистих (8-15 *мкм*) [44].

Автори в роботах [45]-[47] показали, ефективним способом придушення процесу перекристалізації через рідку фазу є наступне – введення до складу сплаву інгібіторів зростання карбідного зерна. Найбільший інгібіторний ефект мають карбіди перехідних металів.

В роботі [48] також розглядається аномальний ріст зерен карбиду вольфраму. Проведені авторами цієї роботи дослідження свідчать про те, що в структурі матеріалу, спеченого з нанопорошків с зниженим вмістом α -WC ($f = 83.5-99.7\%$), спостерігається аномальне зростання зерен – після нагрівання до температури TSPS = 1460-1550 °C в матеріалі формується структура із зернами різних розмірів, в якій середній розмір аномальних зерен (від 3 до 20 μm) більш ніж на порядок перевищує розмір зерен матриці $d_m \sim 0.1 \mu\text{m}$ (рис. 2). Автори помітили, що пори розташовуються переважно по межах аномально великих зерен. При підвищенні температури до TSPS = 1700 °C формується рівномірна грубозерниста структура, в якій пори розташовуються як по межах, так і в обсязі зерен матеріалу.

Дослідження структури зразків, спечених з нанопорошків повністю складаються з монокарбиду α -WC (серії № 5-7) показують, що в цих матеріалах спостерігається нормальний ріст зерен і має місце мономодальний розподіл зерен за розмірами.

Один з найголовніших результатів даної роботи - це немонотонний (з максимумом) характер залежності оптимальної температури спікання від початкового розміру часток, що спостерігається в умовах аномального росту зерен.

Причиною немонотонного характеру залежності $T(R_0)$ є ефект підвищення коефіцієнта зернограничної дифузії D_b^* в умовах аномального росту зерен [49], що приводить до зменшення характерного часу протікання дифузійно-контрольованого процесу, що описується формулою:

$$\tau_{diff} = \delta D_b^* / x^3,$$

де x – характерний масштаб дифузійного переносу.

З роботи [49] відомо, границі, що мігрують зі швидкістю V_m «замітають» розподілені в зернах ґраткових дислокацій і забезпечують, тим самим, «потік дефектів (І)», що активно «бомбардують» границі зерен:

$$I = \xi_m V_m \rho_v,$$

де ξ_m – поля дислокацій одного знаку, що потрапляють на границю;

ρ_v – густина ґраткових дислокацій.

Як результат, йде підвищення D_b^* . Після ряду математичних операцій, автори роботи [50] приходять до висновку, що прискорення зернографічної дифузії є причиною зниження оптимальної температури спікання. Це найбільш помітно при появі аномально великих зерен карбіду вольфраму. Для оптимізації необхідно так підібрати режим спікання, щоб при нагріві здійснювалась достатньо швидка міграція зерен, що характеризується низьким значенням D_b^* .

Так, якщо, наприклад, порівняти мікроструктури при режимі спікання 30/30 та 15/30, то видно присутні значно більша кількість аномальних великих зерен саме при режимі 30/30, що співпадає з попередніми розрахунками та середні значення: умовного розміру, площі та периметру зерен.

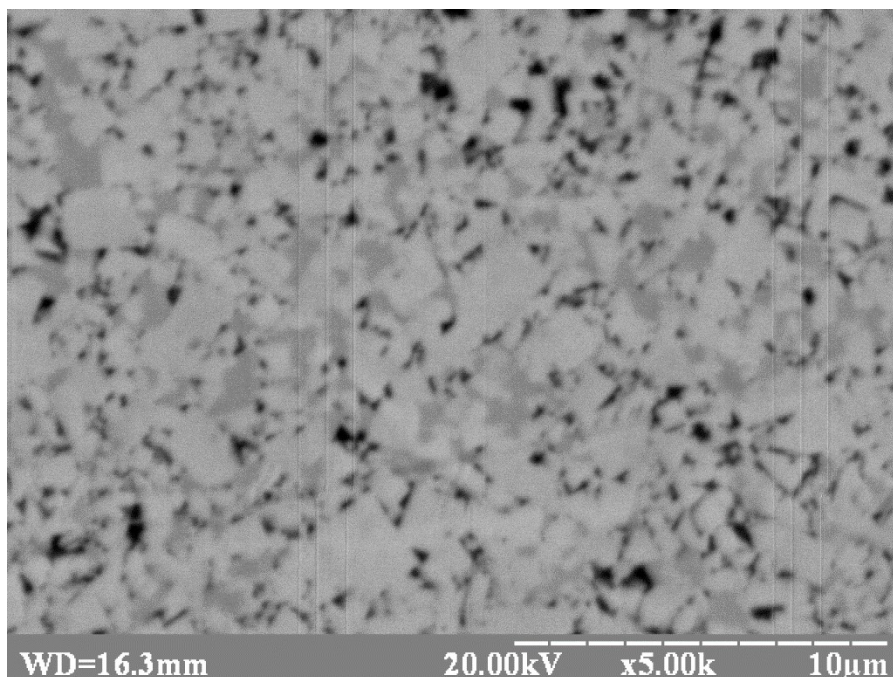


Рисунок 3.1 – мікроструктура при режимі 30/30

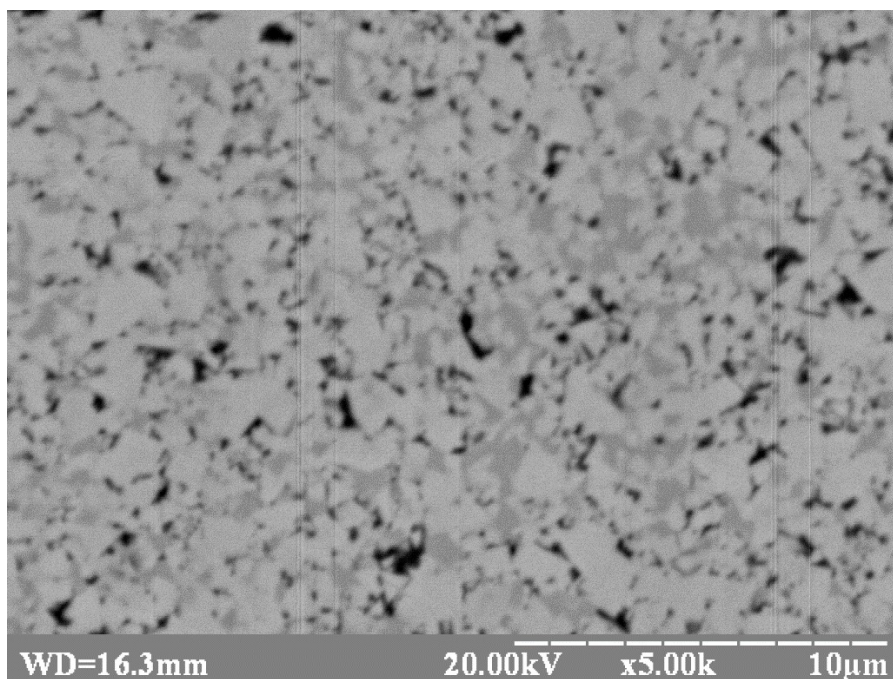


Рисунок 3.2 – мікроструктура при режимі 15/30

Як результат, зобразимо отримані залежності від режиму спікання у вигляді двовимірних графік, що зображені на наступних рисунках 3.3-3.5:

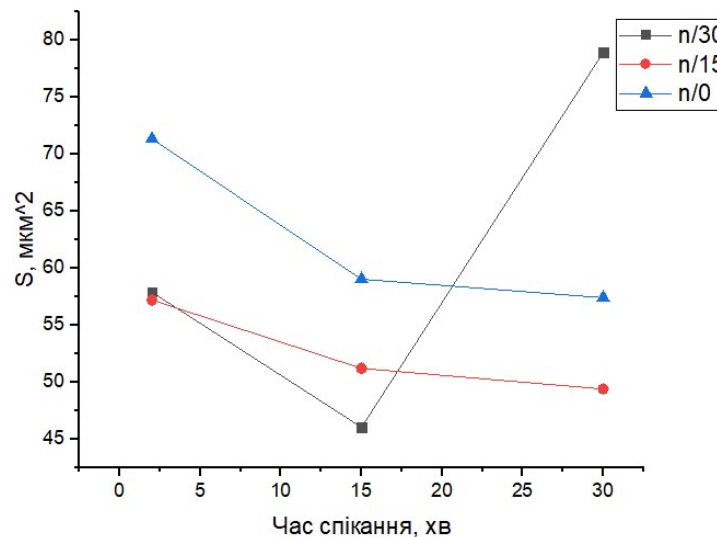


Рисунок 3.3 – Графік залежності площі зерен від режимів спікання

При побудові графіків також необхідно розрахувати довірчі інтервали.

Основні параметри, що знадобляться для знаходження довірчих інтервалів:

n – кількість дослідів, σ – середнє квадратичне, M – вибіркове середнє значення, D

– оцінка дисперсії та Φ – функція Лапласа, що має вигляд $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{x^2}{2}} dx$, або

знаходиться за таблицями.

В нашому випадку точність рівна 0,95, тому:

$$2\Phi(t) = 0,95$$

$$\Phi(t) = 0,475$$

$$t = t_y = 1,96$$

Знайдемо довірчі інтервали для площі (для інших величин механізм розв'язання однаковий)

$$M = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^8 S_i = 58,694$$

$$D = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=0}^8 S_i^2 - M^2 \right] \cdot \frac{n}{n-1} = 109,717$$

$$\sigma_M = \sqrt{\frac{D}{n}} = 3,492 ;$$

$$M - \frac{\sigma_M}{\sqrt{2}} t_y = 53,855 ;$$

$$M + \frac{\sigma_M}{\sqrt{2}} t_y = 63,533 .$$

$S \in (53,855; 63,533)$ з надійністю 0,95.

Складемо загальну таблицю довірчих інтервалів (табл. 3.2), та одразу побудуємо графік залежності периметру зерен від режимів спікання, котрий представлений на рисунку 3.4.

Таблиця 3.2 – Довірчі інтервали

| Величина | S | P | d | η | HRa | Уд.В. | $\sigma_{згин}$ |
|-------------|------|------|-----|--------|------|-------|-----------------|
| Нижня межа | 53,8 | 30,7 | 6,6 | 5,9 | 88,2 | 31,6 | 1709 |
| Верхня межа | 63,5 | 34,6 | 7,5 | 7,1 | 88,9 | 32,2 | 1731 |

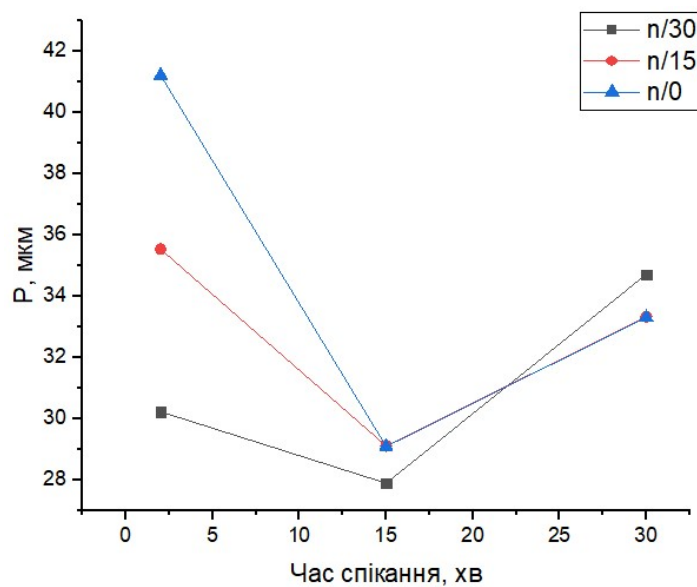


Рисунок 3.4 –Графік залежності периметру зерен від режимів спікання

Як видно із рисунка 3.3 при зростанні часу спікання зменшується показник площі S , проте для режиму 30/30 збільшення часу спікання навпаки збільшило цей показник. Це зумовлено саме появою аномально великих зерен. Периметр в свою чергу, не так сильно залежить від значень довжин границь зерен, і середнє значення є більш менш однаковим. Характер залежності є однаковим – стрімке падіння і підйом.

В свою чергу, автори роботи [49] вказують на те, що занадто великий час спікання це дуже погано. Через це можуть протікати різні процеси: знеуглецювання, науглецювання чи втрата кобальту при вакуумному спіканні. Якщо ж збільшити температуру спікання, то це може призвести за короткий проміжок часу до росту аномально великих зерен чи до пережогу.

Залежність розміру зерен від час спікання представлена на рисунку 3.5.

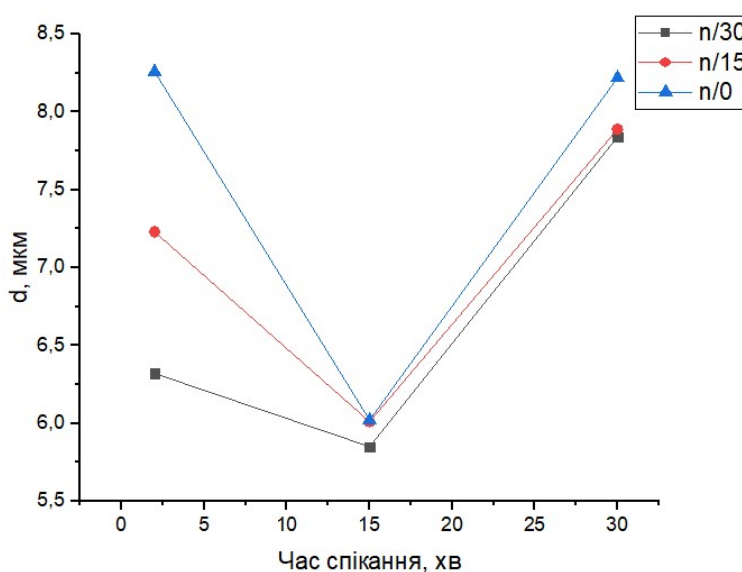


Рисунок 3.5 –Графік залежності умовного розміру зерен від режимів спікання

Характер залежності умовного розміру зерен збігається із попередніми рядками. Як висновок можна сказати, що якщо функцією залежності в цих випадках може слугувати парабола. Досить цікавим є також той факт, що тільки значення площі постійно спадає, якщо не брати до уваги режим 30/30. В інших випадках, тобто для периметру та для умовного розміру зерен, залежність дійсно може бути описана як параболічна.

3.2 Дослідження механічних властивостей

Після розгляду та аналізу структури, що є безумовно першочерговою причиною та наслідком, можна розглянути механічні властивості. Для цього, занесемо всі данні в таблиці, для полегшення сприйняття даних та зобразимо графіки, для наявної демонстрації присутніх залежностей, якщо такі звісно є.

Таблиця 3.2 – механічні значення

| | 30\30 | 15\30 | 2\30 | 30\15 | 15\15 | 2\15 | 30\0 | 15\0 | 2\0 |
|--------------------------------------|-------|-------|------|-------|-------|------|------|------|------|
| Твердість, HRA | 90,3 | 88,9 | 88,1 | 88,8 | 88,5 | 88,0 | 88,7 | 88,1 | 87,9 |
| Ударна в'язкість, кДж/м ² | 31,2 | 32,1 | 32,4 | 30,9 | 31,7 | 32,0 | 31,5 | 32,5 | 33,1 |
| Межа міцності на згин | 1750 | 1730 | 1700 | 1740 | 1730 | 1700 | 1740 | 1710 | 1680 |
| Ідеальна міцність σ_{id} | 90,4 | 89,0 | 88,2 | 88,9 | 88,6 | 88,1 | 88,8 | 88,2 | 88,0 |

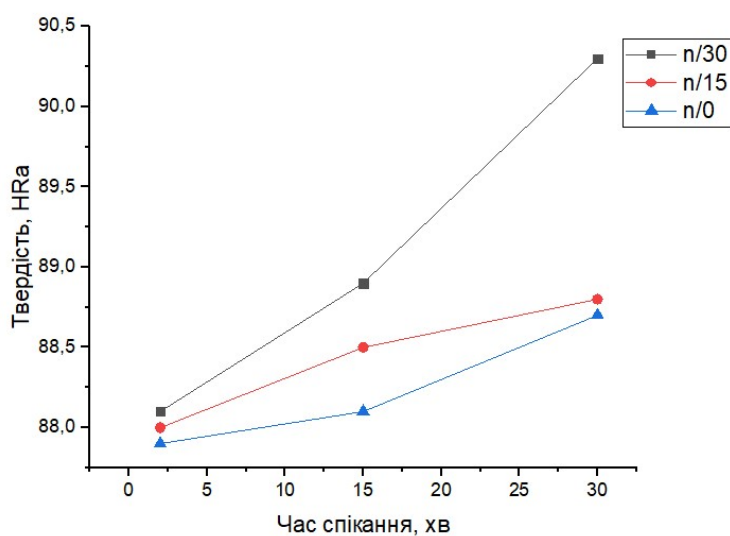


Рисунок 3.6 –Графік залежності твердості від режимів спікання

Твердість, як одна із головних характеристик має чіткий характер залежності

– при збільшенні час спікання збільшується і твердість. Розміри ета-фази в свою також мають V -подібну залежність. Дана залежність представлена на рисунку 3.7.

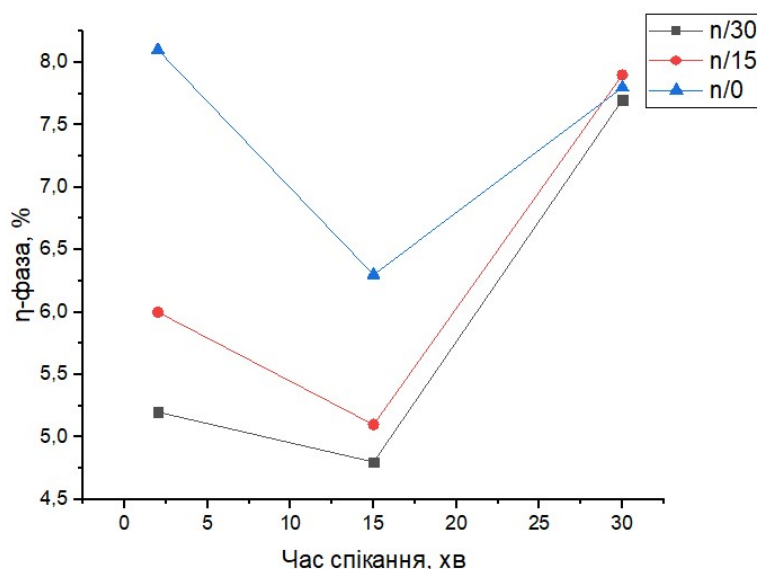


Рисунок 3.7 –Графік залежності кількості η -фази від режимів спікання

3.3 Дослідження оптимізації режимів спікання

Оптимізація режимів спікання надала нам одну єдину точку, в котрій всі задані умови виконувалися. Основною проблемою стало те, що для всіх параметрів не вдалося виконати розрахунок через довготривалу роботу комп'ютера та відсутності точок оптимізації. Це пояснюється тим, що кількість пройдених точок прямо пропорційна до кількості параметрів. Тобто, при збільшенні кількості параметрів збільшується й кількість точок. Швидкість збільшення – геометрична. Після ж зміни меж оптимізації оптимальних точок не було. Таким чином вдалося зробити висновок, що при заданих двох змінних (в нашому випадку це час попереднього та власного спікання) можна провести оптимізацію для $2n+1$ параметрів, де n – кількість змінних в регресійній моделі.

Розглянемо результати оптимізації більш детально, для цього складемо таблицю, в котрій будуть записані найкращі результати вимірюваних величин та оптимізованих:

Таблиця 3.3 – Порівняльна таблиця експериментальних та розрахункових значень

| Режим/ Властивість | 15\30 | 30\15 | 30\0 | 12\30 |
|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|
| <i>H_{Ra}</i> | 88,9 | 88,8 | 88,7 | 88,8 |
| <i>d</i> , мкм | 5,85 | 7,89 | 8,22 | 5,6 |
| <i>P</i> , мкм | 27,89 | 33,33 | 33,31 | 26,4 |
| <i>S</i> , мкм ² | 46,03 | 49,39 | 57,41 | 53,2 |
| <i>η</i> , % | 4,8 | 7,9 | 7,8 | 4,6 |

Як видно з таблиці 3.3 вдалося зменшити у порівнянні з режимом 15\30 умовний розмір зерен, їх периметр та кількість ета-фази. Показник твердості практично не змінився, а збільшився тільки показник площі. Це можна пояснити тим, в режимах 30\30 та 2\30 більше аномально великих зерен карбіду вольфраму а площа є більш чутливою до зміни розмірів сторін зерна.

3.4 Дослідження моделі поведінки тріщини

Після отриманих даних по оптимізації було виконано програмне генерування структури. Як результат, в нас є можливість не тільки отримати ідеальні значення структури за наших технічних умов, а й отримати зображення, без необхідності уявляти структури, та задаватися питанням: «Як воно буде виглядати?».

Отримана структура генерується за аналогією до отриманих структур в ряді проведення експериментів. Цей метод широко застосовується в програмуванні, коли є необхідність повторити та відтворити якийсь процес без необхідності вдавання в подробиці цього процесу. Тобто йде наслідування за вже готовим результатом. Власне, в програмуванні такий метод так і називається, а суть його полягає в тому, що необхідно розробити новий клас, котрий буде відрізнятися не

значною мірою від вже існуючого [50]. В нашому випадку – це копіювання об’єктів з вже готового результату без необхідності моделювати процес їх зародження.

Після генерування структури був процес побудови математичною моделі, котра дала змогу оцінити маршрут проходження тріщини. Очевидно, що наша модель достатньо спрощена, але вона дає змогу первинної оцінки.

Можна виділити наступні висновки, що головною причиною отримання такою структури є неякісний вихідний матеріал. Також, згідно [49] аномальний ріст зерна проходить із-за підвищення коефіцієнта зернограничної дифузії. Було досліджено ряд механічних властивостей, що приблизно збігається з комерційними продуктами. Виявлений ряд залежностей збігається з очікуванням.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

В даному розділі будуть розглянуті питання охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях при оптимізації технології спікання твердих сплавів. Тому, що такі етапи, як: просів, замішування з пластифікатором, сушка суміші, пресування, спікання – є потенційно небезпечними.

При проведенні експерименту важливо дотримуватись вимог та правил безпеки, адже виробництво виробів з твердих сплавів несе багатогранну небезпеку, на кожному етапі є окремі фактори ризику, а саме: подразнення слизистих оболонок носу, горла та захворювання легеневих тканин; можливість отримання опіків в разі загорання парів бензину; можливе отримання травм при роботі на пресах; можливість бути ураженим електричним струмом у разі відсутності заземлення при роботі з пічним обладнанням; можливість отримати пошкодження різної ступені важкості в разі не своєчасної перевірки балонів та інше. Тому актуальність цього розділу є доцільна.

На разі діє наказ від 28.12.2017 № 2072 Про затвердження Вимог безпеки та захисту здоров'я під час використання виробничого обладнання працівниками [51].

4.1 Небезпечні і шкідливі виробничі фактори

Як вже раніше було зазначено, виробничий процес несе у собі ряд ризиків та небезпек. Це стосується кожної окремої операції. За походженням шкідливі та небезпечні виробничі фактори поділяють на: фізичні, хімічні, психофізіологічні, біологічні та соціальні.

Доцільним є запис таких факторів у вигляді таблиці, адже значно легше перерахувати ряд можливих ризиків на окремих ділянках виробництва з подальшою можливістю швидкого аналізу інформації. Далі наведена таблиця 4.1 в котрій перераховані операції, устаткування, котре використовується при даній операції та можливі потенційні небезпеки:

Таблиця 4.1 – Шкідливі і небезпечні фактори, які можуть мати місце при виконанні магістерської роботи.

| Найменування операцій | Устаткування | Потенційні небезпеки |
|-----------------------|---|---|
| Пресування | Гідравлічний прес, розбірна прес-форма | Механічне травмування |
| Обробка експерименту | Портативний комп'ютер | Ураження електричним струмом, нервово- емоційне перенавантаження, зорове навантаження |
| Замішування | Ступка, скельце | Ураження дихальних шляхів |
| Спікання | Піч СШВЛ | Ураження електричним струмом |
| Отримання шліфів | Шліфувальна машина | Механічне травмування |

4.2 Безпечність технологічного процесу

Одними із основних процесів, що викорситовувалися в цій роботі та несуть в собі потенційний ризик були: подрібнення, замішування, сушка та спікання.

Операція подрібнення, мабуть, є одною із найбезпечніших операцій, так як відсутній безпосередній контакт із небезпечними речовинами та присутня герметизація, як футированого контейнера, в котрому проходив процес подрібнення, так і робочих вузлів механізму. Оператор повинен один раз встановити контейнер а наступними днями просто вмикати та вимикати верстат, адже цей процес є досить тривалим. Негативний шумовий ефект практично не впливає на оператора через відсутньої необхідності бути безпосередньо біля обладнання в момент подрібнення. Також, відсутні фактори втоми. В разі поломки верстат вимикається автоматично. Його робота неможлива в разі заклинування чи інших механічних поломок вузлів.

Замішування проходить із використанням вже подрібненого порошку

карбїду вольфраму та із спиртом з пластифікатором на основі синтетичного каучук. Безпосередній контакт усувається через використання гумових рукавиць. Також, використовується витяжка, щоб уникнути вдихання дрібних часток порошку та парів спирту.

Процес сушки схожий на процес подрібнення, адже прямої присутності не треба. Температури сушки досить низькі і не потребують герметизації пічного обладнання. Процес діставання заготовок проходить із використання спеціальних вогнетривких рукавиць для унеможливлення вірогідності отримання опіку.

В ході роботи для дослідження мікроструктури також слід виконати процес виготовлення шліфів. Сам процес полягає в шліфуванні торцевих поверхонь заготовки на шлівмашині. Оберти достатньо високі для того, щоб вирвати заготовку з рук оператора, проте напрям руху диску та захисний кожух практично унеможливають потрапляння заготовки в чутливі ділянки тіла, такі як очі. В разі удару заготовки об тіло травматичний ефект відсутній. Проте, в разі неувважності оператора можливе пошкодження кінчиків пальців, якщо сильно притиснути руку до абразивного круга.

Процес спікання є найнебезпечнішим із процесів.

Приступати до роботи можна виключно після того, як наладчик чи майстер перевірить його справність.

При роботі на пічному обладнанні слід проводити заходи, що застерігають від ураження електричним струмом, тобто перевіряти повну справність електропроводів; обладнання повинно мати на корпусах елементи заземлення та бути надійно заземлено.

Найчастіше, при роботі вакуумної печі використовується дифузійний паромасляний вакуумний насос через високу швидкість роботи. За методом захисту людини від ураження струмом дифузійні паромасляні насоси, що найчастіше використовуються в науково-дослідницьких установах, відносять до електрообладнання 1 класу за ПУЕ 2017 року [52]. Джерелом можливого ураження людини електричним струмом є нагрівач та корпус насосу. Для попередження ураження електричним струмом якраз і виконують надійне заземлення цих

елементів, шляхом під'єднання мідного провідника-заземлювача діаметром 3 мм до болта затискачу-заземлювача. Заземлення повинно бути виконано згідно вимог ПУЕ [52].

При запуску та роботі печі необхідно дотримуватись черги виконання операцій. Перед початком роботи необхідно увімкнути загальну вентиляцію, яка надалі повинна працювати безперервно. Необхідно впевнитися в щільності всіх сполучень та отворів в печах, перевірити справність трубопроводів, які проводять та відводять водень. Після цього здійснюється продувка печі до повного видалення повітря, не менше 40-45 хвилин для печей з графітотрубчатими нагрівачами та 35 хвилин для печей попереднього спікання.

Оператор, хоч і вільний в момент самого спікання, проте він повинен завжди бути на готові. В разі припинення потрапляння води в охолоджувальній системі та в разі розгерметизації вмикається звукова сигналізація. В разі припинення потрапляння води, слід спершу перевірити крани та патрубки. В разі неможливості швидкої поладки піч необхідно вимкнути.

4.3 Безпечність виробничого обладнання

Про безпечність обладнання ми вже частково розказали в попередньому розділі. Очевидно, що всі елементи кожного із обладнань виготовлені із необхідних матеріалів. Так, футирований контейнер виготовлений із нержавіючої сталі, а внутрішні стінки футировані ВКЗ. Патрубки в печі виготовлені із прозорих матеріалів для можливості швидкої перевірки наявності потоку води. Корпус печі виготовлений із жароміцної сталі. Піч перед початком роботи перевіряється на заземлення згідно ПУЕ [52].

Також, можна згадати про процес пресування. Його головні елементи – поршень, колона, та циліндра – виготовлені із якісної сталі. Бак із маслом є герметичним. В разі не герметичності баку робота пресу не можлива. Для захисту від випадкових уламків, що можуть вилітати з великою швидкістю у напрямку до оператора використовується захисний сталевий кожух. Матриця та пуансон

виготовлені із високоякісної сталі, так як все зусилля пресу передається на них.

Слід також зауважити, що в разі поломки та неможливості швидкого ремонтування, оператор млину та сушильної печі повинен звернутися до лаборантів, котрі завідують цим майном, котрі в свою чергу вже повинні повністю оцінити стан поломки та в разі чого викликати слюсаря-ремонтника. Якщо виникла поломка вакуумної печі, котра може пошкодити герметизації слід негайно покинути приміщення та сповістити лаборантів. Самостійний ремонт не допускається.

Щодо безперервності робіт, то можна виділити наступне: млин працює від моменту включення та до моменту виключення його оператором без необхідності контролю; робота печі залежить від режимів спікання, однак в цьому випадку, хоча оператор може не знаходитись постійно біля неї, він повинен періодично перевіряти подачу холодної води в систему охолодження. Найдовшим процесом, де задіяне безпосередньо виконавець – пресування. Пресування проходило на механіко-гідравлічних пресах, і в цьому випадку, середня ефективність роботи складає – 8 од/год. При такому типі робіт є можливість робити перерви.

Основним робочим елементом шліфувальної машини є алмазний шліфувальний диск. Конструкція механізму унеможлиблює подрібнення цього диску на менші шматки, які потенційно могли б спрямуватися в оператора. В разі несправності механізмів, що призводять рух диску запуск неможливий. Основні елементи шліфувальної машини виконані з якісної нержавіючої сталі. В разі поломки слід звернутися до лаборанта, котрий в свою чергу в разі неможливості налаштування/ремонтування установки повинен звернутися до слюсаря-ремонтника.

4.4 Заходи та засоби безпеки

Детально розглянувши технологічні операції з точки зору охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях, можна зробити висновок, що всі технологічні операції задовільняють нормам, встановленим законодавством. Все обладнання

має певні захисні деталі чи елементи: сталевий кожух, звукова сигналізація, автоматичне вимкнення та інше. Робочі місця – ергономічні, є можливість відпочинку та є спеціальні виділення місця для нагляду за обладнанням. Частина процесів повністю автоматизована. Устаткування виконане з якісних матеріалів. Самі технологічні процеси максимально усувають контакт із небезпечними речовинами. Є наявність герметизація на відповідних ділянках.

5 ЕНЕРГЕТИЧНИЙ РОЗДІЛ

Метою енергетичного розділу проекту є розрахунок кількості електроенергії, необхідної для забезпечення нормальної роботи цеху, а також витрат палива, газів та інших джерел енергії.

Обсяг витрат електроенергії на технологічне обладнання визначають на підставі вибору і розрахунку кількості обладнання та його потужності в режимі роботи:

$$E = M\Phi_0\eta_{зв}K_1K_2,$$

де M – встановлена потужність обладнання, кВт;

Φ_0 – річний фонд часу роботи обладнання, год;

$\eta_{зв}$ – коефіцієнт завантаження обладнання;

K_1 – коефіцієнт одночасності роботи (беруть рівним: для електричних печей 0,6, для двигунів 0,3, для генераторів високочастотного нагріву 0,8);

K_2 – коефіцієнт використання потужності рівний 0,7.

Витрати енергії підйомно-транспортного обладнання визначають, виходячи з його потужності.

В умовах малотоннажних виробництв транспортувальне обладнання вибирають разом з основним, його характеристики вносять у відомість основного обладнання.

Витрати енергії для санітарно-технічних пристроїв (вентиляції, опалення) визначають згідно з вимогами до охорони праці та техніки безпеки.

Планетарний млин для змішування:

$$E = 2,8 \cdot 240 \cdot 8 \cdot 0,75 \cdot 0,3 \cdot 0,7 = 846,72 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

Сушильна піч:

$$E = 1,6 \cdot 240 \cdot 8 \cdot 0,6518 \cdot 0,3 \cdot 0,7 = 420,49 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

Піч СШВЛ:

$$E = 50 \cdot 240 \cdot 6 \cdot 0,605 \cdot 0,8 \cdot 0,7 = 24393,6 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

Результати розрахунків витрат електроенергії зводимо у таблицю 5.1, де K_c - кількість споживачів; N – потужність, кВт; $k_{одн}$ – Коефіцієнт одночасності роботи; $T_{рчр}$ – Фонд робочого часу на рік, год; $k_{зав}$ – Коефіцієнт завантаження

Таблиця 5.1- Річні витрати електроенергії

| Найменування струмоприймача | K_c | N | $k_{одн}$ | $T_{рчр}$ | $k_{зав}$ | Річні витрати електроенергії, кВт·год |
|------------------------------------|-------|-----|-----------|-----------|-----------|---|
| Планетарний млин для змішування | 4 | 2,8 | 0,3 | 540,00 | 0,75 | 3386,88 |
| Піч сушильна | 1 | 1,6 | 0,3 | 1251,46 | 0,6518 | 420,49 |
| СШВЛ | 1 | 50 | 0,8 | 2453,76 | 0,605 | 24393,6 |
| Всього | | | | | | 28200,97 |

Розрахунок витрат енергії на освітлення для кожного приміщення виконують на підставі плану цеху. Вихідні дані для розрахунку - площа приміщення, потрібна освітленість і режим роботи освітлювальних точок.

Витрати енергії на освітлення розраховують за формулою:

$$Q = Sq \cdot \eta / 1000,$$

де S – освітлювана площа, м²;

q – поверхнева щільність теплового потоку, Вт/м²;

τ – кількість годин горіння на рік;
 f – коефіцієнт одночасного горіння.

Значення q зазвичай беруть: для виробничих приміщень – 11 - 15 $Вт/м^2$, для побутових і службових приміщень - 10 $Вт/м^2$.

Залежно від тривалості освітлювального періоду значення τ беруть рівним: для двозмінної роботи - 2500 год, для тризмінної - 4700 год.

Коефіцієнт, який враховує одночасність горіння ламп, беруть: для виробничих прогонів - 0,8, для побутових та службових приміщень - 0,7, для підвалів - 0,9.

Розрахунок витрат електроенергії на освітлення.

Склад матеріалів:

$$Q = 45 \cdot 15 \cdot 2500 \cdot 0,8 / 1000 = 1350 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

Дільниця для замішування:

$$Q = 85,5 \cdot 15 \cdot 2500 \cdot 0,8 / 1000 = 2565 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

Дільниця для спікання:

$$Q = 130 \cdot 15 \cdot 4700 \cdot 0,8 / 1000 = 7332 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

Побутові приміщення:

$$Q = 91,66 \cdot 10 \cdot 4700 \cdot 0,7 / 1000 = 3015,614 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

Канторські приміщення:

$$Q = 34,51 \cdot 10 \cdot 2500 \cdot 0,7 / 1000 = 603,925 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

Склад готової продукції:

$$Q = 30,76 \cdot 15 \cdot 2500 \cdot 0,7 / 1000 = 807,45 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

Результати розрахунків витрат електроенергії зводимо у таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 - Річні витрати електроенергії на освітлення

| Найменування споживача | Освітлювана площа, м ² | Поверхнева щільність теплого потoku, Вт/м ² | Кількість годин горіння на рік | Річні витрати електро- енергії, кВт*год |
|----------------------------|--------------------------------------|--|---|---|
| Склад матеріалів | 45 | 15 | 2500 | 1350 |
| Дільниця замішування | 85,5 | 15 | 2500 | 2565 |
| Дільниця для спікання | 130 | 15 | 4700 | 7332 |
| Побутові приміщення | 91,66 | 10 | 4700 | 3015,614 |
| Конторські приміщення | 34,51 | 10 | 2500 | 603,925 |
| Склад готової продукції | 30,76 | 15 | 2500 | 807,45 |
| Всього | | | | 15673,99 |

6 ОРГАНІЗАЦІЙНИЙ РОЗДІЛ

6.1 Розрахунок чисельності виробничих робітників та їх заробітної плати

Чисельний склад та кваліфікацію робітників виробничої дільниці обчислюємо з урахуванням кількості устаткування та змінності роботи.

Після цього, визначимо заробітну плату робітникам. Витрати на оплату праці є одним із основних елементів собівартості продукції. Вони складаються з: основної заробітної плати; додаткової заробітної плати; інших заохочувальних та компенсаційних виплат.

Основна зарплата - це винагорода за виконану роботу відповідно до встановлених норм праці (норми часу, виробітку, обслуговування, посадові обов'язки).

Додаткова зарплата - винагорода за працю понад установлені норми, за трудові успіхи та винахідливість, за особливі умови праці. Вона включає доплати, надбавки, премії, пов'язані з виконанням виробничих завдань і функцій, та ін.

До інших заохочувальних та компенсаційних виплат належать виплати за підсумками роботи за рік, премії за спеціальними системами і положеннями, компенсаційні грошові і матеріальні виплати, які не передбачені актами чинного законодавства та ін.

Основним організаційно-правовим інструментом обґрунтування диференціації заробітної плати працівників різних суб'єктів господарювання (діяльності) є тарифно-посадова система, основні елементи якої такі: тарифно-кваліфікаційні довідники; кваліфікаційні довідники посад керівників, спеціалістів і службовців; тарифні сітки й ставки; схеми посадових окладів або єдина тарифна сітка

Тарифно-кваліфікаційні довідники у вигляді Єдиного тарифного кваліфікаційного довідника робіт і професій робітників (ЄТКД) - це збірник нормативних актів, що містить кваліфікаційні характеристики робіт і професій, згруповані за виробництвами та видами робіт. ЄТКД призначено для тарифікації робіт, надання кваліфікаційних розрядів робітникам, а також для формування навчальних програм підготовки їх підвищення кваліфікації робітників. Плановий час роботи одного працівника за рік розраховуємо шляхом складання балансу

робочого часу. Цей розрахунок представлений у таблиці 6.1:

Таблиця 6.1 – Плановий баланс робочого часу на рік

| Найменування витрат часу | Кількість днів |
|--|----------------|
| Кількість номенклатурних днів на рік | 365 |
| Неробочі дні, у тому числі: | 125 |
| - загальнодержавні та релігійні свята | 9 |
| - вихідні | 104 |
| Час на планово-попереджувальний ремонт | 12 |
| Робочий час підприємства | 240 |
| Витрати робочого часу працівників, у тому числі: | 26 |
| - хвороба Цей | 4 |
| - чергові та додаткові відпустки | 20 |
| - невиходи з дозволу адміністрації | 3 |
| - скорочення робочого часу матерям | 1 |
| Плановий фонд робочого часу робітників за рік | 214 |

На підставі балансу робочого часу визначаємо обліковий склад робітників, який визначається з а допомогою коефіцієнта облікового складу $K_{обл}$:

$$K_{обл} = \Phi_{реж} / \Phi_{пл},$$

де $\Phi_{реж}$ – робочий річний фонд часу роботи підприємства, днів;

$\Phi_{пл}$ – плановий фонд робочого часу працівника за рік, днів.

$$K_{обл} = 240 / 214 = 1,12.$$

Загальна чисельність працівників ділянки приведена в таблиці 6.2.

Таблиця 6.2 – Чисельність основних та допоміжних робітників ділянки

| Професія, спеціальність, посада | Кваліфікаційний розряд | Явочна чисельність по змінах | | | Загалом на добу | Коефіцієнт переводу | Облікова чисельність |
|---------------------------------------|---------------------------|------------------------------------|-----|-----|--------------------|------------------------|-------------------------|
| | | 1-а | 2-а | 3-я | | | |
| Основні робітники | | | | | | | |
| Пресувальник | 3 | 1 | | | 1 | 1,12 | 2 |
| Оператор млина | 2 | 1 | | | 1 | 1,12 | 1 |
| Просіювальник | 3 | 2 | | | | 1,12 | 2 |
| Оператор СШВЛ | 5 | 2 | | | 2 | 1,12 | 2 |
| Всього основних робітників | | | | | 4 | | 7 |
| Допоміжні робітники | | | | | | | |
| Слюсар-ремонтник | 4 | 1 | | | 1 | 1,12 | 1 |
| Електромонтер | 4 | 1 | | | 1 | 1,12 | 2 |
| Прибиральник | 2 | 1 | | | 1 | 1,12 | 1 |
| Усього допоміжних робітників | | | | | 3 | | 4 |
| Усього робітників діляниці | | | | | 7 | | 11 |

6.2 Визначення фондів заробітної плати

Основним організаційно правовим інструментом обґрунтування диференціації заробітної плати працівників підприємств різних форм господарчої діяльності є тарифно – посадова система, елементи якої: тарифно-кваліфікаційні довідники; кваліфікаційні довідники посад керівників, спеціалістів і службовців.

Важливим елементом тарифної системи є тарифна ставка. Її абсолютну величину визначають згідно зі встановленим державою мінімальним розміром заробітної плати. Так, якщо на підприємстві тарифну ставку для першого розряду встановлено на рівні 9,2 грн., то ставка другого розряду становитиме 10,0096 грн., третього 11,0768 грн. і так далі.

Типова тарифна сітка робітників різногалузевих підприємств та організацій України наведена в таблиці 6.3.

Таблиця 6.3 – Типова тарифна сітка робітників різногалузевих підприємств

| Показники | Тарифні розряди | | | | | | | |
|----------------------------------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Тарифні коефіцієнти | 1,0 | 1,088 | 1,204 | 1,350 | 1,531 | 1,800 | 1,892 | 2,0 |
| Зростання тарифних коефіцієнтів: | | | | | | | | |
| Абсолютне | | 0,088 | 0,116 | 0,146 | 0,181 | 0,269 | 0,092 | 0,108 |
| Відносне | | 8,8 | 10,7 | 12,1 | 13,4 | 17,6 | 5,1 | 5,7 |

Розрахунок фондів зарплати управлінського персоналу наведено в таблиці 6.4.

Таблиця 6.4 – Розрахунок фонду заробітної платні управлінського персоналу

| Професія, спеціальність | Чисельність осіб | Місячний посадовий оклад, грн. | Річний фонд заробітної плати, грн. |
|---------------------------|------------------|--------------------------------|------------------------------------|
| Начальник дільниці | 1 | 20000 | 240000 |
| Майстер | 1 | 12000 | 144000 |
| Усього по дільниці 384000 | | | |

Розрахунок фондів зарплати основних та допоміжних робітників наведено в таблиці 6.5.

Таблиця 6.5 – Розрахунок фондів зарплати основних та допоміжних робітників

| Професія, спеціальність | Кваліфікаційний розряд | Годинна тарифна ставка | Облік складу, осіб | Плановий робочий фонд за рік одного працівника год | Плановий робочий фонд за рік всіх працівників, год | Основна заробітна плата, грн | Розрахунок додаткової плати, грн | | | | | Разом зарплата, грн |
|-------------------------|------------------------|------------------------|--------------------|--|--|------------------------------|----------------------------------|---------------------|----------------|-----------|------------------------------------|---------------------|
| | | | | | | | Премія, 40% | Особливі умови, 12% | Відпустка, 12% | Інші, 12% | Разом додаткова зарплата, тис. грн | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| Пресувальник | 3 | 60,20 | 2 | 1712 | 3424 | 103062,40 | 41224,96 | 12367,49 | 12367,49 | 12367,49 | 78327,43 | 181389,83 |
| Оператор млина | 2 | 54,45 | 1 | 1712 | 1712 | 93218,40 | 37287,36 | 11186,21 | 11186,21 | 11186,21 | 70845,99 | 164064,39 |
| Просіювальник | 3 | 60,20 | 2 | 1712 | 3424 | 103062,40 | 41224,96 | 12367,49 | 12367,49 | 12367,49 | 78327,43 | 181389,83 |
| Оператор СШВЛ | 5 | 76,55 | 1 | 1712 | 1712 | 131053,60 | 52421,16 | 15726,43 | 15726,43 | 15726,43 | 99600,45 | 230654,05 |
| Допоміжні робітники | | | | | | | | | | | | |
| Слюсар-ремонтник | 4 | 67,50 | 1 | 1712 | 1712 | 115560,00 | 46224,0 | 13867,25 | 13867,25 | 13867,25 | 87825,75 | 203385,75 |
| Електромонтер | 4 | 67,50 | 2 | 1712 | 3424 | 115560,00 | 46224,0 | 13867,25 | 13867,25 | 13867,25 | 87825,75 | 203385,75 |
| Прибиральник | 2 | 54,45 | 1 | 1712 | 1712 | 93218,40 | 37287,36 | 12367,49 | 12367,49 | 12367,49 | 74389,83 | 167608,23 |
| Разом | 11 | | | | | | 577142,63 | | | | | 1331877,83 |

В даному розділі було розраховано фонди заробітних плат як основних так і допоміжних робітників. Розраховано також і фонд заробітної плати управлінського персоналу. Виконано розрахунок планового балансу робочого часу на рік та чисельність основних та допоміжних робітників дільниці. Заробітна плата орієнтовно схожа з основними підприємствами, де така заробітна плата є прийнятною.

7 ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ

7.1 Науково-технічна актуальність

Актуальність проведеного магістерського дослідження можна підтвердити розглянувши наступні значущі аспекти роботи, а саме:

- науковий;
- технічний;
- економічний;
- соціальний;
- екологічний.

Перш за все, варто зазначити, що проведення під час написання роботи аналізу літературних джерел [1-51], переконливо засвідчило значних інтерес науковців і дослідників-практиків до проблеми твердих сплавів та їх широкого використання в сучасному виробництві зокрема для виготовлення різального інструменту: фрези, свердла, мітчики та інше.

Зважаючи на сучасний політичний розвиток світового суспільства, особливої значимості набуває використання твердих сплавів під час виготовлення бронепластин для потреб військових.

Зрозуміло, що оптимізація технології зможе пришвидшити появу партій нових виробів, що призведе до збільшення власне використання товарів із покращеною структурою в різних сферах суспільного виробництва. Реорганізація діючого виробництва завдяки вдосконаленню технології має в цілому позитивний вплив на екологічну систему, що може проявлятися зокрема в зменшенні впливу на екосистему шляхом зменшення споживання електроенергії. Підвищення якості виробів збільшує час експлуатації виробів. Це в свою чергу зменшує витрати на сировину. Соціальне значимість пов'язана з тим, що вдосконалення технологічного процесу виробництва має позитивний вплив на умови праці робітників, так як в результаті покращення якості виробів, потреби виробництва задовільняються за більш оптимальних режимів, що може призвести до збільшення заробітної плати, так як

виробництво після оптимізації не потребує додаткового устаткування чи модернізації наявного.

7.2 Розрахунок витрат на проведення НДР

Для розрахунку витрат складемо таблицю витрат:

Таблиця 7.1 – Таблиця витрат

| Операції/Матеріал | Тип витрат | Кількість витрат | Вартість, грн |
|---------------------------|----------------|------------------|---------------|
| Порошок карбіду вольфраму | Матеріал | 1 кг | 2786,84 |
| Каучук синтетичний | Матеріал | 10 г | 17,12 |
| Бензин | Матеріал | 200 мл | 33,48 |
| Спирт технічний | Матеріал | 200 г | 114,19 |
| Сушка | Електроенергія | 1600 Вт × 2 год | 5,55 |
| Подрібнення | Електроенергія | 2200 Вт × 56 год | 213,60 |
| Жирові добавки | Матеріал | 5 г | 8,00 |
| Спікання | Електроенергія | 35 кВт × 36 год | 2184,47 |
| Загальне значення | - | - | 5363,25 |

Слід зробити зауваження, що вартість витрат розраховувалась за цінами проведення експерименту. Електроенергія – за цінами ПАО «КиївЕнерго» для юридичних осіб, що складає 172,371 коп/кВт·год без НДС.

7.3 Витрати на оплату праці

Розрахунок витрат основної зарплати ведеться на підставі даних по трудомісткості виконання окремих етапів НДР і денної заробітної плати виконавців. Для виконання НДР залучаються такі науково-технічні робітники:

- відповідальний виконавець теми, с.н.с.;

- інженер-дослідник;
- лаборант.

Денна заробітна плата визначається як відношення місячної ставки до "умовного місяця", що для ВНЗ із п'ятьма робочими днями в тиждень складає 21.3 дня. Трудомісткість етапів виконання НДР подана в табл. 4.3.

Таблиця 7.2 - Трудомісткість етапів виконання роботи

| Етапи НДР | Відповід викон. теми, снс | Інженер-дослідник | Лаборант |
|--|---------------------------|-------------------|----------|
| Вивчення літератури | 40 | - | - |
| Вивчення методики проведення роботи | 5 | 5 | - |
| Підготування устаткування і проведення експериментів | 5 | 10 | 10 |
| Спікання зразків | 9 | 20 | 20 |
| Виготовлення шліфів | 1 | - | - |
| Металографічний аналіз | - | 10 | - |
| Знімки мікроструктури | - | 8 | - |
| Проведення механічних випробувань | 36 | 12 | 12 |
| Опрацювання результатів | 21 | - | - |
| Оформлення результатів роботи | 14 | - | - |
| Разом | 131 | 65 | 42 |

Основний фонд заробітної плати приведений у табл. 4.4. Заробітна плата визначається як добуток трудомісткості на денну зарплату виконавця. Основний фонд заробітної плати буде рівним:

$$\text{ОФЗП} = \text{ОЗП}_{\text{снс}} + \text{ОЗП}_{\text{інж}} + \text{ОЗП}_{\text{лаб}} = 29642,9 \text{ грн},$$

де $OЗП_{снс}$ – основна заробітна плата с.н.с.;

$OЗП_{інж}$ - основна заробітна плата інженера-дослідника;

$OЗП_{лаб}$ - основна заробітна плата лаборанта.

Таблиця 7.3 - Основний фонд заробітної плати

| Посада виконавців | Місячний оклад, грн | Денна зарплата, грн | Трудовісткість, люд.дні | Сумарна зарплата, грн |
|--------------------------------|---------------------|---------------------|-------------------------|-----------------------|
| Відповідальний виконавець теми | 7240 | 176,6 | 131 | 23134,6 |
| Інженер-дослідник | 6414 | 61,1 | 65 | 3971,5 |
| Лаборант | 3926 | 60,4 | 42 | 2536,8 |
| Всього | | | | 29642,9 |

5.4 Єдиний соціальний внесок

Єдиний соціальний внесок (ЄСВ) – це обов’язкове відрахування на загальнодержавне соціальне страхування. З 1 січня 2016 р. ставка ЄСВ складає 22 %. Базою для нарахування ЄСВ слугують загальні витрати на оплату праці по темі (підсумок по табл.1.2).

$$ЄСВ = ЗП \cdot 0,22 ,$$

де ЗП – загальні витрати на оплату праці по темі.

Наразі ЄСВ буде становити:

$$ЄСВ = 29642,9 \cdot 0,22 = 6521,44 \text{ грн.}$$

5.5 Науково-технічна ефективність НДР

Розрахунок очікуваного економічного ефекту НДР необхідно для визначення доцільності проведення даної роботи.

Проте він може бути розрахований лише по НДР, які безпосередньо спрямовані на створення нових матеріалів, покращення параметрів якості продукції, а також створення нових конструкцій.

Для визначення річного економічного ефекту скористаємося бальною системою оцінювання економічної ефективності за наступними показниками:

- важливість розробки (K_1);
- можливість використання результатів розробки (K_2);
- теоретичне значення та рівень новизни (K_3);
- складність дослідження (K_4).

Коефіцієнт K_1 може приймати наступні значення:

- а) ініціативна робота, яка не входить до складу комплексної програми та не є завданням директивних органів – 1 бал;
- б) робота виконується за угодою про науково-технічне співробітництво – 3 бали;
- в) робота являє собою частину відомчої програми – 5 балів;
- г) робота являє собою частину комплексної міжвідомчої програми з елементами впровадження результатів – 7 балів;
- д) робота є частиною міжнародної комплексної програми – 8 балів.

Коефіцієнт K_2 може приймати такі значення:

- а) результати розробки можна використати тільки в даному підрозділі – 1 бал;
- б) результати розробки можуть бути використані тільки однією організацією – 3 бали;
- в) результати розробки можуть бути використані декількома організаціями – 5 балів.
- г) результатами розробки можуть користуватися в масштабах однієї

галузі – 8 балів;

д) результатами розробки можуть користуватися у різних галузях – 10 балів.

Коефіцієнт K_3 може приймати такі значення:

а) робота являє собою аналіз, узагальнення або класифікацію відомої інформації, подібні результати раніше були відомі в досліджуваній галузі – 2 бали;

б) під час виконання роботи отримана нова інформація, яка доповнює уявлення про сутність досліджуваних процесів – 3 бали;

в) внаслідок виконання роботи отримана нова інформація, яка частково змінює уявлення про природу досліджуваних процесів – 5 балів;

г) внаслідок виконання НДР створені нові теорії, методики тощо – 6 балів;

д) отримана інформація формує принципово нові уявлення, які не були відомі раніше – 8 балів.

Коефіцієнт K_4 може приймати такі значення:

а) роботу виконує один підрозділ, витрати до 10 000 гривень – 1 бал;

б) роботу виконує один підрозділ, витрати від 10 000 до 50 000 гривень – 3 бали;

в) роботу виконує один підрозділ, витрати від 50 000 до 100 000 гривень – 5 балів;

г) робота виконується декількома підрозділами, витрати від 100 000 до 200 000 гривень – 7 балів;

д) робота виконується декількома організаціями, витрати понад 200 000 гривень – 9 балів.

Загальна бальна оцінка (Б) вираховується перемноженням коефіцієнтів:

$$Б = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4$$

В нашому випадку бальна оцінка ефективності згідно табл. 1.5

становить:

$$Б = 3 \cdot 10 \cdot 3 \cdot 5 = 450$$

Таблиця 7.4 – Бальна оцінка ефективності НДР

| Показник оцінки ефективності НДР | Умовне позначення показника | Характеристики даної роботи | Кількість балів |
|---|-----------------------------|--|-----------------|
| 1. Важливість розробки | K_1 | Робота виконується за угодою про науково-технічне співробітництво | 3 |
| 2. Можливість використання результатів розробки | K_2 | Результатами розробки можуть користуватися у різних галузях | 10 |
| 3. Теоретична значимість та рівень новизни розробки | K_3 | Під час виконання роботи отримана нова інформація, яка доповнює уявлення про сутність досліджуваних процесів | 3 |
| 4. Складність дослідження | K_4 | Роботу виконує один підрозділ, витрати до 100 000 гривень | 5 |

Умовний ефект НДР розраховується за формулою:

$$E_{\text{НДР}}^y = 500 \cdot Б - E_{\text{н}} \cdot B_{\text{НДР}},$$

де 500 – умовна вартість одного балу;

$E_{\text{н}}$ – нормативний коефіцієнт економічної ефективності (може бути в межах 0,1 – 0,3);

$B_{\text{НДР}}$ – сумарні витрати на виконання НДР (підсумок табл. 1.4);

У нашому прикладі умовний ефект виконання НДР буде становити:

$$E_{\text{НДР}} = 500 \cdot 450 - 0,2 \cdot (60911,911 + 5365,25) = 211744,97 \text{ грн.}$$

Економічна ефективність НДР визначається коефіцієнтом умовної економічної ефективності E_e . Він є відношенням умовного ефекту виконання НДР до сумарних витрат на виконання НДР та розраховується за формулою:

$$E_e = \frac{E_{\text{НДР}}}{B_{\text{НДР}}}.$$

У нашому прикладі E_e буде становити:

$$E_e = \frac{211744,97}{66275,16} = 3,19$$

Коефіцієнт умовної економічної ефективності науково-дослідної роботи становить 3,19 (перевищує одиницю), що свідчить про доцільність її виконання.

8 РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ

8.1 Актуальність

В даній роботі розглядається оптимізація режимів спікання твердих сплавів. Оптимізація складається з проведення експериментів на обладнанні, котре знаходиться у розпорядженні підприємства, та власне підбір режимів спікання після проведення ряду досліджень та випробувань, результатом котрих буде математична модель.

Як видно з попереднього абзацу, витрати виробництва мінімальні, а покращення режимів призводить до покращення мікроструктури, що в свою чергу призводить до покращення ряду механічних властивостей.

Актуальність підтверджується й асортиментом виробів, для котрих необхідний твердий сплав: різальні та гірничовидобувні інструменти, вимірювальні прилади, деталі авіа та авіакосмічного будування, військова техніка та спорядження.

8.2 Опис ідеї проекту

Для опису ідеї складемо ілюстрацію у вигляді таблиці 8.1:

Таблиця 8.1 – Опис ідеї стартап проекту

| Зміст ідеї | Напрямки виробництв | Вигоди для підприємств |
|---|---------------------|---|
| Створення технології, яка зможе оптимізувати технологію виробництва при наявному обладнанні | 1) Масове | 1) Оптимізація розмірів зерен (збільшення чи зменшення) |
| | 2) Серійне | |
| | 3) Одиничне | |
| | 4) Експериментальне | 2) Оптимізація механічних властивостей 3) Зменшення витрат на електроенергію |

Основною ідеєю, як можна було зрозуміти є те, що підприємство мінімізує витрати при мінімальному втручанні. В умовах великих підприємств, весь процес оптимізації може бути здійснений протягом 1 дня! При наявності однакових печей, можна провести спікання одразу за всіма необхідними режимами, провести випробування та побудувати математичну модель. Як результат, вже на наступний день підприємство у виграші.

8.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Для успіху необхідно проаналізувати: сегмент споживачів, ринок споживачів та канали збуту.

Сегмент споживачів: весь світ.

Ринок споживачів – нішевий (вузький профіль – виробництва, які використовують матеріали з твердих сплавів, хоча сам метод оптимізації може використати для будь-якого виробництва, що спеціалізується на порошковій металургії).

Канали збуту: використовуються прямі канали збуту. Безпосередній контакт з потенційними покупцями через візити на підприємства та презентації технології. Контакт через тематичні та галузеві виставки та конференції. Створення власних конференцій. Друк в наукових та економічних тематичних виданнях.

Так як потреба технології є очевидна, а конкуренції на цьому напрямку немає, адже кожне підприємство оптимізує лише власні технології та вдосконалює власні потужності, то створення компанії, котра б надавала послуги саме по оптимізації є більш ніж раціональною, адже виробництва – це часто досить консервативне середовище. Люди віддали все життя виробництву, і інколи їм важко пристосуватись до нових умов та використовувати інноваційні методи. Вони звикли роботи все так, як вже робили сотні раз. Тому компанія, яка б спеціалізувалася на покращенні товару

вже існуючого виробництва без необхідності другого в вкладанні великого капіталу в модернізацію – це дійсно потенційний проект.

Перелік сильних та слабких сторін дасть змогу реально оцінити всі слабкі та сильні сторони проекту представлені в таблицях 8.2 та 8.3.

Таблиця 8.2 – Сильні та слабкі сторони проекту (SWOT-analysis)

| Сильні сторони (S) | Слабкі (W) |
|---|---|
| Відсутність необхідності в закупівлі обладнання. Можливість дистанційної роботи. Малий особовий склад компнії. Широкий асортимент. | В разі наявності на виробництві обладнання, яке не може витримувати задані режими з заданою похибкою, оптимізація не можлива. Необхідність в наявності довіреної чи власної лабораторії на перевірку механічних властивостей. В разі необхідності модифікації технології потрібно задіяти висококваліфікований персонал |

Таблиця 8.3 – Можливості та загрози проекту (SWOT-analysis)

| Можливості (O) | Загрози (T) |
|--|---|
| Посилення позиції ринку Вихід на нові ринки Підвищення кваліфікації особового складу | Поява конкуренції Швидке копіювання конкурентами Захоплені ділянки ринку важко відвоювати |

8.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

Ринкова стратегія підприємства розробляється на основі досліджень і прогнозування кон'юнктури товарного ринку, вивчення покупців, вивчення товарів, конкурентів та інших елементів ринкового господарства. Найбільш поширеними стратегіями маркетингу є:

- проникнення на ринок;
- розвиток ринку;
- розробка товару;
- диверсифікація.

Спираючись на основні характеристики послуги, варто визначитись з базовою стратегією розвитку підприємництва. Оскільки дана послуга передбачає зменшення витрат при покращенні структури матеріалу, а наявних спеціалізованих підприємств не має, то очевидно, що необхідно обрати лідерську позицію, котра заключається в тому, що підприємство прагне зайняти провідне місце на ринку, розвиває нові технології і пропонує нові продукти, не звертаючи уваги на потенційні ризики.

Також, можна обрати стратегію Спрінклера, по виходу на зовнішні ринки, не дивлячись на те, що вона рекомендована для товарів із короткотривалим життєвим циклом схема котрої представлена на рисунку 8.1.

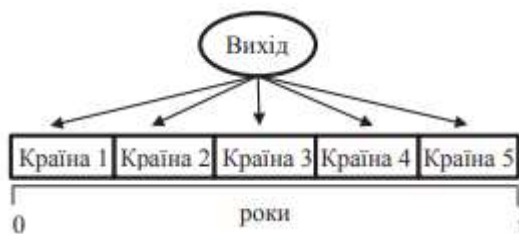


Рисунок 8.1 – Схема стратегії Спрінклера

8.5 Аналіз ринку збуту товару

Також для входження на ринок слід враховувати цільову аудиторію, на яку буде направлений збут товарів та послуг, враховуючи потреби та вимоги споживачів, так як вони формують ринок (табл.8.4).

Таблиця 8.4 – Характеристика потенційних клієнтів Стартап-проекту

| № | Потреба, що формує ринок | Цільова аудиторія | Відмінність у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів | Вимоги споживачів до товару |
|---|---|-------------------|--|--|
| 1 | Зменшення розміру зерен без додаткових витрат | Машино-будівна | До даних деталей застосовують спеціальні випробування, та стандарти, які визначають самі покупці | Вимоги до технології: - низька вартість; - висока стабільність; Вимоги до компанії - стабільність технології та поставок; - можливість корегування замовленням під час виробництва. |

8.6 Розробка логотипу

Очевидно, що з такою агресивною політикою компанії необхідно підібрати відповідний логотип. Пропонується обрати наступний логотип, котрий також буде і товарним знаком компанії, в разі переходу компанії на новий ринок, чи при друку публічних матеріалів (рис. 8.1).



Рисунок 8.1 – Логотип компанії

Товарний знак являє собою оригінальну композицію і є цілотною невідомою картиною. Знак відноситься до зображувальних. Знак являє собою картину, на котрій зображена акула та зірка. Пропорційно акула та зірка не відповідає дійсності. Лінії, котрими зображені обидва елементи, є жирні, та в акули товстіші на 17 %. Зірка являє собою п'ятикутну фігуру та нарисована так, щоб складався ефект об'ємності, завдяки проведенням середнім лініям від вершин до центру. Акула нарисована ескізно, в котрій можна розрізнити: зуби, око, зябра та власне тіло риби. Також намальована вода у вигляді w подібного елемента, що знаходиться під пащею акули. Зображення намагається передати ефект – акула роззявила пащу на зірку.

ВИСНОВКИ

В результаті проведеної роботи було досліджено механічні властивості твердого сплаву ВК8, котрий спікався за експериментальними режимами. Також, виконано побудову математичної моделі оптимізації режимів спікання та модель розповсюдження тріщини.

Механічні властивості твердого сплаву ВК8 за експериментальними режимами був в діапазоні значень комерційних продуктів. Проте в структурі присутня велика кількість крупних зерен, що вже раніше обговорювалося і основною причиною вважається неякісна вихідна суміш.

Тим не менш, завдяки моделі оптимізації режимів було розраховано, що оптимальні значення механічних властивостей можна отримати за наступного режиму спікання: температура попереднього спікання 1000 °С; час попереднього спікання 30 хвилин; температура спікання 1380 °С; час спікання 12 хвилин. За такого режиму деякі механічні властивості зберігаються, відносно найкращого результату після спікання до оптимізації, але вдалося зменшити умовний розмір зерен та кількість ета-фази приблизно на 5 %.

Після побудови моделі розповсюдження тріщини в майбутньому при конструюванні окремих виробів можна буде зробити поправки ще на стадії конструювання змінивши режими спікання. Якщо ж зміна режимів спікання не вирішить проблему, то вона може бути вирішена шляхом зміни конструкції чи матеріалу виробу.

CONCLUSIONS

As a result of the work, the mechanical properties of the VK8 hard alloy, which sintered according to the experimental modes, were investigated. Also, a mathematical model of sintering optimization and a crack propagation model were constructed.

The mechanical properties of VK8 hard alloy in the experimental modes were in the range of values of commercial products. However, the structure contains a large number of large grains, which has been discussed previously and is considered to be the main reason for the poor quality of the initial mixture.

However, due to the mode optimization model, it was calculated that the optimum values of mechanical properties can be obtained from the following sintering mode: pre-sintering temperature 1000 ° C; pre-sintering time 30 minutes; sintering temperature 1380 ° C; sintering time 12 minutes. Under this mode, some mechanical properties are retained, relative to the best result after sintering before optimization, but it has been possible to reduce the conditional grain size and the amount of the phase phase by about 5%.

After constructing a crack propagation model in the future, when designing individual products, it will be possible to make corrections at the design stage by changing the sintering modes. If changing the sintering modes does not solve the problem, then it can be solved by changing the design or material of the product.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Davis J. Cemented Carbides and Cermets [Text] / J. Davis // Metal Handbook. – 1998. – № 2. – P. 634–638.
2. Mari D. Cermets and Hardmetals [Text] / D. Mari // Encyclopedia of materials. – 2001. – № 6. – P. 1118–1123.
3. Бронеодежда. Классификация и общие технические требования (с Изменениями № 1, 2) : ГОСТ Р 50744-95. – [Введён с 27.02.1995] – М. : Росстандарт, 1995. – 11 с.
4. БРОНЕСТАЛЬ 3 ЄС ДЛЯ БТР-4 [Электронный ресурс] УкрОборонПром. – Режим доступа: <https://ukroboronprom.com.ua/uk/media/bronestal-z-yes-dlya-btr-4-vijskova-pryjomka-prodovzhuye-blokuvaty-vyrobnytstvo-bojovyh-mashyn.html> – Назва з екрану. – Дата перегляду: 14.10.2019.
5. Степанчук А. Н. Технология порошковой металлургии [Текст] / А. Н. Степанчук, И. И. Билык, П. А. Бойко. – К. : Вища школа, 1989. – 415 с.
6. Третьяков В. И. Основы металловедения и технологии производства спеченных твердых сплавов [Текст] / В. И. Третьяков. – М. : Металлургия, 1976. – 528 с.
7. Панов В. С. Технология и свойства спеченных твёрдых сплавов [Текст] / В. С. Панов, А. М. Чувилін, В. А. Фальковский. – М. : МИСиС, 2004. – 428 с.
8. Сплавы твердые спеченные. Марки (с Изменениями № 1-6) : ГОСТ 3882-74 (ISO 513-75). – [Введён с 15.08.1974]. – М. : Государственный комитет СССР по стандартам, 1974. – 16 с.
9. Гончаренко И. М. Физические основы разработки и производства твердых сплавов [Электронный ресурс] : Модуль 1 / И. М. Гончаренко. – [Электрон. дан.]. – 2005. – 18 с. – Режим доступа: <https://docplayer.ru/52450840-Fizicheskie-osnovy-razrabotki-i-proizvodstva-tverdyh-splavov.html> – Название с экрана. – Дата просмотра: 17.10.2019.

10. Мильман Ю. В. Влияние структурного состояния и температуры на механические свойства и механизмы деформации твердого сплава WC-Co / Ю. В. Мильман // Сверх твёрдые материалы. – 2014. – №2. – С. 3–23.
11. Твердые сплавы. Марки твердых сплавов. Применение твердых сплавов [Электронный ресурс] / ГП Стальмаш [офиц. веб-сайт]. – Название с экрана. – Режим доступа: <http://yaruse.ru/posts/show/id/949>. – Дата просмотра: 20.10.2019.
12. Твёрдый сплав BK8 [Электронный ресурс] / VSE. – Название с экрана. – Режим доступа: http://vse.ru/materials/metal/10213_tverdyj-splav-vk8/ – Дата просмотра: 20.10.2019.
13. Киффер Р. Твёрдые сплавы [Текст] / Р. Киффер, Ф. Бенезовский. – М. : Металлургия, 1971. – 392 с.
14. Терентьев Д. С. Особенности формирования вольфрамокобальтовых твердых сплавов с наночастицами монокарбида вольфрама [Текст] / Д. С. Терентьев // XV международная научно-техническая Уральская школа-семинар металловедов-молодых ученых : материалы. – Пермь, 2014. – С. 96–98.
15. Панов В. С. Твердые сплавы WC–Co, легированные карбидом тантала [Текст] / В. С. Панов, А. А. Зайцев // ПМ и ФП Известие вузов. – 2015. – № 2. – С. 44– 48.
16. Панов В. С. Режущие свойства твердосплавного инструмента легированного карбидом тантала [Текст] / В. С. Панов, В. Ф. Функе, В. Я. Лидер // Вестник машиностроения. – 1962. – № 3 – С. 5.
17. Mahmoodan M. Hard alloys [Text] / M. Mahmoodan, H. Aliakbarzadeh, R. Gholamipour // Int. J. Refract. Metal. Hard Mater. – 2009. – № 27. – P. 801.
18. Формирование твердого сплава BK8 с использованием порошка карбида вольфрама, синтезированного по механохимической технологии [Текст] / В. П. Рева, Д. В. Онищенко, В. В. Петров [и др.] / Новые огнеупоры. – 2013. – №2. – С. 39–43.

19. Penrice TW. Alternative binders for hard metals [Text] / TW. Penrice // Journal of Materials Shaping Technology. – 1988. – Vol. 5. – P. 35–39.
20. Takeda S. Physics of new materials [Text] / S. Takeda // Sendai. – 1931. – Vol. 10. – P. 42–92.
21. Rautala P. Tungsten–cobalt–carbon system [Text] / P. Rautala, JT Norton // Trans AIME. – 1952. – Vol. 4, №4. – P. 1045–1050.
22. Pollock CB. The eta carbides in the Fe–W–C and Co–W–C systems [Text] / Pollock CB. Stadelmaier HH. // Metall Trans. – 1970. – P. 767–770.
23. Gruter M. Thesis: Untersuch ungen in den Systemen Co–C, Co–WC [Text] / M. Grutter. – Münster : Deutschland, 1959. – 403 p.
24. Авдеенко Е. Н. Разработка нового поколения иерархических крупнозернистых твердых сплавов с особо однородной структурой [Электронный ресурс] : Дис. ... канд. технических наук. – Название с экрана. – Режим доступа: https://misis.ru/files/13175/Диссертация_Авдеенко%20Е.Н.pdf. – Электронные текстовые данные (1 файл, 11747 КБ). – Дата просмотра: 21.09.2019.
25. Савицкий А. П. Жидкофазное спекание систем с взаимодействующими компонентами [Текст] / А. П. Савицкий. – Новосибирск : Наука, 1991. – 184 с.
26. Моделирование поведения титанового сплава ВТ20 при ударном взаимодействии [Текст] / Е. В. Ломакин, А. М. Брагов, А. Ю. Константинов [и др.] / Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. – 2011. – №2. – С. 129–132.
27. Анализ динамической прочности бронеплит при ударном нагружении расчетно-экспериментальным методом [Текст] / А. Н. Ищенко, Н. Н. Белов, Н. Т. Югов [и др.] / Вестник Томского государственного университета. – 2010. – №2 – С. 71–77.
28. Литошенко Н. В. Оценка условного предела упругости твердого сплава WC–Co при сжатии [Тест] / Н. В. Литошенко // Проблемы прочности. – 2000. – № 1. – С. 111–119.

29. Канель Г. И. Ударные волны в твердых телах: пособие к курсу лекций / Г. И. Канель. – М. : 2017. – 145 с.
30. Каучук синтетический термостойкий низкомолекулярный СКТН ГОСТ 13835-73. – [Введен с 26.02.1973] – М. : Государственный комитет СССР по стандартам, 1973. – 10 с.
31. Муха И. М. Твёрдые сплавы в мелкосерийном производстве [Текст] / И. М. Муха. – К. : Наукова думка, 1981 – 168 с.
32. Розрахунки та випробування на міцність. Терміни та визначення основних понять ДСТУ 2825-94. – [Дійсний з 01.01.1996]. – К. : Держстандарт України, 1994. – 41 с.
33. Вікіпедія: Твердість [Електронний ресурс] // вільна енциклопедія [офіц. веб-сайт]. – Електрон. Дані. – [2013]. – Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Твердість>. – Назва з екрана. – Дата перегляду: 17.10.2019.
34. Smith S. Foundations of Material Science and Engineering [Text] / S. Smith, F. William, J. Hashemi. – New York : McGraw-Hill, 2001. – p. 229.
35. Салтыков С. А. Стереометрическая металлография [Текст] / С. А. Салтыков. – М. : Металлургия, 1970. – 375 с.
36. Вікіпедія: Задача Бюффона [Електронний ресурс] // Вікіпедія: вільна енциклопедія [офіц. веб-сайт]. – Електрон. дані. – [2019]. – Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Задача_Бюффона. – Назва з екрану. – Дата перегляду: 01.05.2019.
37. Генератор чисел онлайн [Электронный ресурс] / Generator–Online. – Режим доступа: <https://generator-online.com/numbers/>. – Название с экрана. – Дата просмотра: 03.05.2019.
38. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах : ГОСТ 9454-78. – [Введён с 17.04.1978]. – М. : Государственный комитет СССР по стандартам, 1978. – 13 с.

39. Испытания на ударную вязкость [Электронный ресурс] / Heat Treatment. – Режим доступа: <https://heattreatment.ru/ispytaniya-na-udarnuyu-vyazkost>. – Название с экрана. – Дата просмотра: 15.10.2019.

40. Пушкарьова К. К. Навчальний практикум з будівельного матеріалознавства [Текст] : Методичні вказівки / К. К. Пушкарьова, В. Б. Барановський. – К. : КНУБА, 2010. – 72 с.

41. Шейко С. П. Комплексная оптимизация химического состава низколегированной стали [Текст] / С. П. Шейко // Вестник двигателестроения. – 2014. – №1. – С. 127-130.

42. Delphi [Электронный ресурс] Idera, Inc [офиц. веб-сайт]. – Электрон. дан. – Режим доступа: <https://www.embarcadero.com/ru/products/delphi>. – Название с экрана. – Дата просмотра: 16.11.2019.

43. Kim Sona Effect of grain motion on the coarsening of WC grains in the carbon-saturated liquid matrix during liquid phase sintering of WC-Co alloys [Text] / Sona Kim, Jong-Ku Park, Dokyol Lee // Scripta Materialia. – 1998. – vol. 38, № 10. – p. 1563– 1569.

44. Sommer M. On the formation of very large WC crystals during of ultrafine WC-Co alloys / M. Sommer, W.-D. Schubert, E. Zobetz // International Journal of Refractory Metals & Hard Materials. – 2002. – № 20. – P. 41–50.

45. Solubilities of grain-growth inhibitors in WC-Co-based cemented carbides: Thermodynamic calculations compared to experimental data / Y. Peng, C. Buchegger, W. Lengauer, Y Du , P Zhou // Int. J. Refract. Met. Hard Mater. – 2016. – Vol. 61. – P. 121–127.

46. Pötschke J. Grain growth inhibition of hardmetals during initial heat-up / J. Pötschke, T. Gestrich, V. Richter // Int. J. Refract. Met. Hard Mater. – 2018. – Vol. 72. – P. 117–125.

47. Solid-state solubilities of grain-growth inhibitors in WC-Co and WC-MC-Co hardmetals / Lukas L., Roman H., Christoph B. [et al.] // J. Alloys Compd. – 2016. – Vol. 675. – P. 407–415.

48. Нохрин А. В. Эффект ускорения зернограницной диффузии при рекристаллизации в субмикрокристаллических металлах и сплавах, полученных методом интенсивного пластического деформирования / А. В. Нохрин // Письма в ЖТФ. – 2012. – Т. 38, В. 13. – С. 70–78.

49. Панов С. В. Технология и свойства спеченных твердых сплавов и изделий из них [Текст] / В. С. Панов, А. М. Чувилін. – М. : МИСиС, 2001. – 428 с.

50. Чмырь И. А. Объектно-ориентированное моделирование [Электронный ресурс]: Конспект лекций и упражнения для практических занятий. Очная форма обучения – 2018 / И. А. Чмырь. – Режим доступа: http://eprints.library.odeku.edu.ua/130/1/ChimirIA_Ob%27yektno-orijentovane_modelyuvannya_2018.pdf. – Электронные текстовые данные (1 файл, 1686 КБ). – Название с экрана. – Дата просмотра: 12.11.2019.

51. Закон України "Про охорону праці", затверджений Постановою Верховної Ради України від 21.11.2002 р. № 229-IV

52. Правила улаштування електроустановок. ПУЕ-2017. – К. : Держстандарт України, 2017. – 617 с.